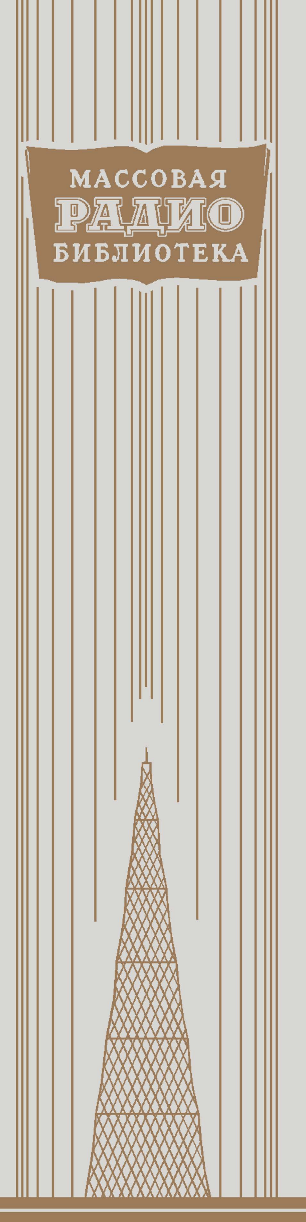
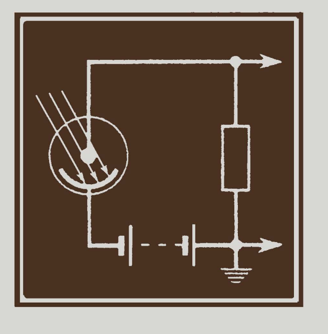



Н. О. ЧЕЧИК

# ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ





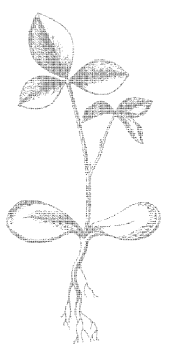
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1955

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

*Выпуск 228*

*Н. О. ЧЕЧИК*

# ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1955 ЛЕНИНГРАД

*В книге приведены основные сведения из светотехники, описаны устройство и принцип действия современных фотоэлементов (вакуумных и газонаполненных, вентильных, фотосопротивлений и фотоумножителей). Приведены также важнейшие параметры и характеристики фотоэлементов. Описаны основные схемы включения и некоторые примеры применения фотоэлементов.*

*Книга предназначена для подготовленных радиолюбителей.*

---

Автор — *Чечик Николай Оскарович*

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Редактор *А. А. Жигарев* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 21/IV 1955 г. Подписано к печати 8/VII 1955 г.
Т-05256. Бумага 84×108 1/32 5,74 печ. л.
Уч.-изд. л. 6,5 Тираж 25 000 экз. Цена 2 р. 60 к. Зак. 185

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

# ПРЕДИСЛОВИЕ

*Фотоэлектрическим эффектом* в широком смысле этого понятия называется возникновение или изменение электрического тока под действием света [1], падающего на один из элементов электрической цепи. Приборы, преобразующие световую энергию в электрическую, действие которых основано на фотоэлектрическом эффекте, называются *фотоэлементами.*

В настоящее время особое внимание уделяется широкому внедрению во все области народного хозяйства новейших достижений науки и техники, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, совершенствованию форм и методов труда и производства, непрерывному повышению уровня научно-исследовательских работ.

Фотоэлементы находят большое и все возрастающее применение во всевозможных областях науки и техники. На использовании фотоэффекта основаны звуковое кино, передача по радио и проводам фотографий (фототеле- ), возможность видения на расстоянии — телевидение.

Значительную роль в автоматизации производственных процессов, совершенствовании форм и методов труда и производства, повышении техники безопасности, выполнении научно-исследовательской работы на более совершенной технической основе должны сыграть фотоэлементы —

---

[1] Фотоэффект проявляется не только под действием видимого света, но также под действием невидимых (инфракрасных и ультрафиолетовых) лучей и других видов излучений (рентгеновские, гамма-лучи).

электрические глаза, способные заменить глаза человека во многих сложных и утомительных процессах.

Книга предназначена для ознакомления широких кругов читателей, в первую очередь квалифицированных радиолюбителей, с важнейшими свойствами, параметрами и характеристиками фотоэлементов, данными современных отечественных фотоэлементов и их важнейшими применениями.

Для читателей, которых заинтересуют более подробные сведения о параметрах фотоэлементов различных типов, а также описания их разнообразных применений, в конце книги приведен список рекомендуемой литературы.

*Автор*

## СОДЕРЖАНИЕ

## *Глава шестая.* Включение и регулирование при помощи фотоэлементов



## *Глава седьмая.* Измерение и регистрация при помощи фотоэлементов

*Глава первая*

# ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

## ЛУЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ И СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Такие формы энергии, как тепловая, химическая, механическая, электрическая, хорошо известны. Наряду с этими формами энергии существует еще одна форма, именуемая *лучистой энергией.*

Лучистой энергией называется энергия совокупности распространяющихся в пространстве электромагнитных волн.

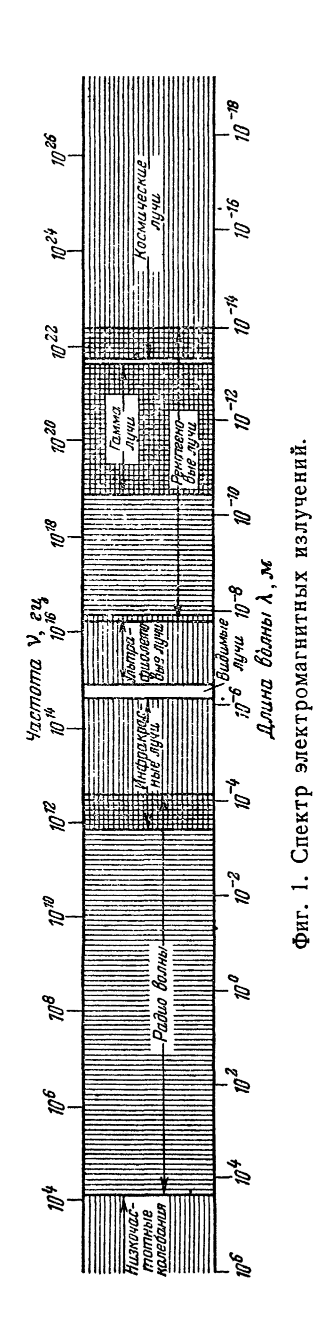
Лучистая энергия распространяется в пространстве во все стороны в виде электромагнитных волн с постоянной скоростью, приблизительно равной $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек.* Эта скорость называется скоростью света. Лучистая энергия характеризуется частотой электромагнитных колебаний или длиной волны излучения.

Между скоростью света $c$, частотой колебаний $\nu$ и длиной волны $\lambda$ существует следующая зависимость: $c = \lambda\nu$. Частота измеряется в герцах (*гц*); 1 *гц* — одно колебание в секунду.

Если скорость света выражена в *см/сек*, то длину волны удобно выражать в *см.* Длину волны принято также выражать в километрах (*км*), метрах (*м*), сантиметрах (*см*), миллиметрах (*мм*), микронах (*мкн*), миллимикронах (*ммкн*), ангстремах (Å) и иксах (X). Эти единицы связаны между собой следующим соотношением:

$$1 \text{ см} = 10^{11} \text{X} = 10^{8} \text{Å} = 10^{7} \text{ ммкн} = 10^{4} \text{ мкн} = 10 \text{ мм} = 10^{-2} \text{ м} = 10^{-5} \text{ км}.$$

Располагая все виды электромагнитного излучения в определенном порядке (например, по возрастанию длины волны), мы получим *спектр электромагнитных излучений*, изображенный на фиг. 1.



Фиг. 1. Спектр электромагнитных излучений.

Как видно на фиг. 1, наименьшей длиной волны обладают космические лучи. Их длина волны порядка $10^{-14}$ — $10^{-18}$ *м*. Далее следует гамма-лучи, рентгеновские, ультрафиолетовые, видимые и инфракрасные лучи, радиоволны и, наконец, низкочастотные электромагнитные колебания $10^{6}$—$10^{4}$ *м*, создаваемые генераторами переменного тока. В электромагнитном спектре видимые лучи занимают узкую полосу, лежащую в интервале $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ — $7{,}6 \cdot 10^{-7}$ *м*, или 0,38 — 0,76 *мкн*. Лучистая энергия обычно измеряется в эргах или джоулях (1 *дж* = $10^{7}$ эрг).

Практически удобно величину лучистой энергии оценивать лучистым потоком, т. е. энергией, излучаемой в единицу времени. *Лучистый поток* Ф является мощностью лучистой энергии и измеряется в эрг/сек или ваттах (1 *вт* = $10^{7}$ эрг/сек).

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПО СПЕКТРУ

Проявление лучистой энергии обнаруживается *приемниками лучистой энергии*. К ним относятся: радиоприемники и индикаторы высокочастотных колебаний, светочувствительные фотографические слои, органы зрения, светящиеся составы (люминофоры), термоэлементы и термосопротивления, фотоэлементы, счетчики гамма-излучения и фотонов и многие другие.

Приемники лучистой энергии различаются своими свойствами.

Существуют селективные (избирательные) приемники, чувствительность которых неодинакова к различным частотам, и неселективные, одинаково чувствительные к излучениям различных частот. Большинство приемников реагирует лишь на лучистый поток, тогда как некоторые приемники, как, например, фотографические слои, кожа человека, светосоставы временного действия, реагируют на продолжительность воздействия лучистой энергии, аккумулируя ее.

Чтобы определить распределение энергии источника по спектру, пользуются неселективными приемниками. Обычно для этой цели служат термостолбики, представляющие собой группу последовательно включенных (и компактно расположенных) термоэлементов, или болометры.

Лучистая энергия может испускаться либо в виде лучей одной длины волны — такая энергия является *однородной* или *монохроматической*, либо в виде лучей различных длин волн, излучаемых одновременно, — в этом случае излучаемая энергия является *неоднородной*. Излучение реальных источников в большинстве случаев является неоднородным.

Можно исследовать распределение энергии по спектру при помощи специальной аппаратуры (монохроматор, спектрограф). Для этого разлагают исследуемое сложное излучение в спектр и направляют пучок монохроматических лучей на частотно-неселективный приемник. Перемещая спектр по приемнику или приемник вдоль спектра, регистрируют распределение энергии по спектру.

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В жизни и деятельности человека важную роль играют температурные источники лучистой энергии. К ним, в частности, относятся: солнце, пламя, электрические лампы накаливания.

Законы температурного излучения устанавливают связь между энергией, излучаемой источником, длиной волны излучения и температурой источника.

Сравнение различных температурных источников осуществляют, пользуясь так называемым абсолютно черным телом.

*Абсолютно черным телом* или *полным излучателем* называется тело, поглощающее всю падающую на него энергию излучения любой длины волны при любой температуре источника.

В природе не существует абсолютно черных тел. Свойствами абсолютно черного тела с большой степенью точности обладает полый угольный шар, в стенке которого имеется небольшое отверстие. Луч света, попавший через это отверстие внутрь шара, многократно отражаясь от стенок, практически полностью поглощается. Если равномерно нагревать такой шар, то его отверстие будет излучать. Это излучение имеет определенную яркость и определенный цвет. Зная законы температурного излучения абсолютно черного тела, можно путем сравнения его излучения с излучением испытываемого тела (при равенстве их цветов или яркостей) определить законы излучения последнего. Температурное излучение характеризуется мощностью излучения с единицы поверхности. Эта величина называется *полной излучательной способностью тела* или *плотностью излучения* $R$. Если излучаемая энергия является однородной, то говорят о *спектральной излучательной способности тела* или *спектральной плотности* $R_\lambda$.

Согласно теории Планка зависимость спектральной плотности излучения абсолютно черного тела от длины волны $\lambda$ и абсолютной температуры $T$* выражается соотношением

$$R_\lambda = C_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1},$$

где $C_1$ и $C_2$ — постоянные величины, а $e$ — основание натуральных логарифмов ($C_1 = 3{,}74 \cdot 10^{-12}$ *вт/см*$^2$; $C_2 = 1{,}43$ *см*·град.; $e = 2{,}718$; $R_\lambda$ выражено в *вт/см*$^3$; $\lambda$ — в *см*).

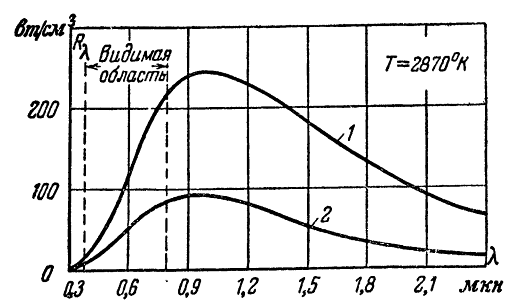
Исходя из размерности спектральной плотности излучения $R_\lambda$, мы можем определить спектральный лучистый поток как $\Phi_\lambda = R_\lambda S$, где $S$ — поверхность, на которую падает поток $\Phi_\lambda$. Полный лучистый поток $\Phi = RS$.

Существующие в природе нечерные тела при той же температуре, что и абсолютно черное тело, поглощают и излучают меньше энергии. Таким образом, спектральная плотность излучения нечерного тела $r_\lambda = e_\lambda R_\lambda$, где коэффициент $e_\lambda$, называемый *монохроматической испускательной способностью тела*, меньше единицы.

---

* Абсолютная температура отсчитывается от так называемого „абсолютного нуля" (—273° С), выражаемого в °К.

Каждое нечерное тело имеет свое значение коэффициента $e_\lambda$, величина которого зависит от температуры и длины волны. Как видно на фиг. 2, при температуре 2 870° К в интервале длин волн 0,45—0,66 *мкн* вольфрам излучает приблизительно в 2 раза слабее, чем абсолютно черное тело. Приближенный способ определения спектральной плотности $r_\lambda$ заключается в сопоставлении яркости или




Фиг. 2. Зависимость спектральной плотности излучения от длины волны.

*1* — для абсолютно черного тела; *2* — для вольфрама

цвета излучения нечерного тела с яркостью или цветом излучения черного тела при одном и том же значении длины волны $\lambda$.

При этом сопоставлении при одинаковой яркости поверхностей абсолютно черного и нечерного тел *действительной* или *истинной температуре поверхности нечерного тела T* будет соответствовать температура $T_я$ абсолютно черного тела, именуемая *яркостной температурой*, а при равенстве сравниваемых цветов — *цветовая температура* $T_ц$ абсолютно черного тела.

*Таблица 1*

| $T$, °K | $T_я$, °K | $T_ц$, °K | $T$, °K | $T_я$, °K | $T_ц$, °K |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 500 | 1 420 | 1 517 | 2 300 | 2 109 | 2 347 |
| 1 600 | 1 509 | 1 619 | 2 400 | 2 192 | 2 452 |
| 1 700 | 1 597 | 1 722 | 2 500 | 2 274 | 2 557 |
| 1 800 | 1 684 | 1 825 | 2 600 | 2 356 | 2 663 |
| 1 900 | 1 771 | 1 929 | 2 700 | 2 437 | 2 770 |
| 2 000 | 1 857 | 2 033 | 2 800 | 2 516 | 2 878 |
| 2 100 | 1 943 | 2 137 | 2 900 | 2 595 | 2 986 |
| 2 200 | 2 026 | 2 242 | 3 000 | 2 673 | 3 094 |

В табл. 1 приведены значения яркостной и цветовой температур, соответствующих значениям истинной температуры вольфрама в интервале 1 500—3 000° К.

## СВЕТОВОЙ ПОТОК И ОСВЕЩЕННОСТЬ

Наши органы зрения являются селективными приемниками лучистой энергии.

Известно, что при дневном зрении глаз наиболее чувствителен к желтым лучам с длиной волны 0,555 *мкн*. При длинах волн излучения, бóльших или меньших 0,555 *мкн*, чувствительность глаза понижается.

Вне интервала 0,38—0,76 *мкн* чувствительность глаза равна почти нулю.

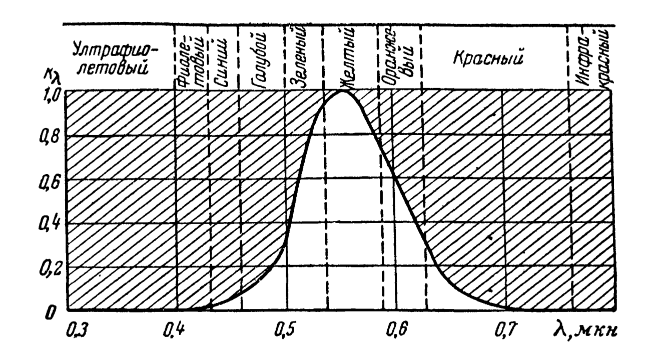
Абсолютная чувствительность глаза к падающему на него монохроматическому лучистому потоку называется *видностью глаза* и обозначается $V_\lambda$. Видность глаза $V_\lambda$ меняется с изменением длины волны, достигая при дневном зрении максимального значения $V_\lambda = V_{\lambda\, макс}$ при $\lambda = 0{,}555$ *мкн*. Принято характеризовать относительную спектральную чувствительность глаза *коэффициентом относительной видности* $K_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_{\lambda макс}}$, который в зависимости от длины волны может принимать значения от 0 до 1. Зависимость коэффициента относительной видности глаза от длины волны (при дневном зрении) приведена на фиг. 3.

Лучистый поток, воспринятый нашим глазом как световое ощущение, называют *световым потоком*. За единицу светового потока принят 1 люмен (*лм*). Можно представить монохроматический световой поток в виде $F_\lambda = V_{\lambda\, макс} K_\lambda \Phi_\lambda$, где $F_\lambda$ измеряется в единицах светового потока — люменах, $\Phi_\lambda$ — в ваттах (*вт*), а $V_{\lambda\, макс}$ имеет постоянное значение, равное 683 *лм/вт*.

*Полный* или *интегральный световой поток* $F$ равен сумме потоков $F_\lambda$, соответствующих всем возможным длинам волн $\lambda$ видимого света от $\lambda_1 = 0{,}38$ *мкн* до $\lambda_2 = 0{,}76$ *мкн*.

Практически величину светового потока $F$ определяют через угловую плотность светового потока — *силу света* $I_{св}$ источника, выраженную в свечах (*св*). В частности, для определения величины светового потока можно поль-

зоваться формулой $F = I_{св} \frac{S}{l^2}$, где $l$ — расстояние от источника света до освещаемой поверхности, *см*, а $S$ — площадь освещаемой поверхности, *см*². В качестве источника света обычно пользуются точечным источником, т. е. таким, у которого светящееся тело имеет очень малую площадь.




Фиг. 3. Кривая относительной видности дневного зрения.

Так, например, если лампа имеет силу света, равную 100 *св*, то световой поток, падающий на поверхность площадью 1 *см*², расположенную на расстоянии 100 *см* от светящегося тела лампы, будет:

$$F = 100 \cdot \frac{1}{100^2} = 0{,}01 \text{ лм}.$$

Падая на поверхность площадью $S$, расположенную перпендикулярно к направлению пучка лучей, световой поток $F$ создает на этой поверхности световое пятно, имеющее *освещенность* $L = \frac{F}{S}$. Таким образом, освещенность есть поверхностная плотность светового потока. Единицей освещенности является люкс (*лк*). Освещенность 1 *лк* создается на площади 1 *м*², на которую падает световой поток величиной 1 *лм*. В тех случаях, когда площадь измеряется в *см*², освещенность 1 *лк* создается потоком, равным $1 \cdot 10^{-4}$ *лм*, падающим на площадь 1 *см*².

## СПЕКТРАЛЬНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКА ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Если облучать приемник лучистой энергии монохроматическим лучистым потоком $\Phi_\lambda$ с такой длиной волны $\lambda$, которая лежит в интервале чувствительности приемника, то *спектральная чувствительность приемника* $\gamma_\lambda$ будет характеризовать реакцию приемника на лучистый поток с длиной волны $\lambda$.

В случае приемников, преобразующих лучистый поток в электрический ток, спектральная чувствительность определяет величину тока, получающегося в результате облучения приемника единицей мощности монохроматического лучистого потока.

Предположим, что мы имеем некоторый источник лучистой энергии, позволяющий плавно изменять длину волны монохроматического лучистого потока $\Phi_\lambda$, сохраняя при любых значениях длины волны $\lambda$ мощность потока постоянной. Облучая этим потоком приемник, мы получим *абсолютную спектральную характеристику приемника*, выражающую зависимость спектральной чувствительности $\gamma_\lambda$ от длины волны $\lambda$. Здесь $\gamma_\lambda$ выражена в некоторых абсолютных единицах, например *а/вт*.

Допустим, что мы имеем дело с селективным приемником. Тогда, установив по характеристике максимальное значение $\gamma_\lambda$, т. е. $\gamma_{\lambda\,макс}$, можно определить *относительную спектральную чувствительность приемника* $\gamma_0 = \gamma_\lambda/\gamma_{\lambda\,макс}$. В максимуме чувствительности $\gamma_\lambda = \gamma_{\lambda\,макс}$, а следовательно, $\gamma_0 = 1$.

Для неселективного приемника $\gamma_\lambda = \gamma_{\lambda\,макс}$ при любом значении $\lambda$, а следовательно, $\gamma_0$ равно единице при любой длине волны $\lambda$.

Характеристика, выражающая зависимость относительной спектральной чувствительности $\gamma_0$ от длины волны $\lambda$, называется *относительной спектральной характеристикой приемника* или, кратко, спектральной характеристикой приемника.

Реальные источники лучистой энергии, в частности источники температурного излучения, имеют неравномерное распределение энергии по спектру. Поэтому, пользуясь ими для определения спектральной характеристики приемника, необходимо учитывать распределение энергии в спектре источника.

Если облучать приемник полным лучистым потоком, то реакция приемника на этот поток характеризуется *полной* или *интегральной чувствительностью приемника.*

Интегральная чувствительность приемника $\gamma$ равна сумме спектральных чувствительностей $\gamma_\lambda$, соответствующих всем длинам волн $\lambda$, лежащим в интервале чувствительности приемника $(\lambda_0 - \lambda_{гр})$.

Графически интегральная чувствительность приемника представляет собой площадь, ограниченную кривой, выражающей зависимость $\gamma_\lambda$ от $\lambda$, и осью абсцисс.

Интегральная чувствительность $\gamma$ выражается в тех же единицах, что и $\gamma_\lambda$. У фотоэлектрических приемников лучистой энергии интегральная чувствительность выражается в *а/вт.* Когда фотоэлектрический приемник чувствителен лишь к видимым лучам, его интегральная чувствительность выражается в *а/лм.* В этом случае, кроме распределения энергии в спектре источника, следует учитывать также характеристику относительной видности. Иногда, однако, допускают ошибку, выражая в *а/лм* интегральную чувствительность фотоэлектрического приемника, чувствительного к ультрафиолетовым и инфракрасным лучам. Причина ошибки станет понятной, если учесть, что вне интервала 0,38—0,76 *мкн*, видность $V_\lambda$ равна нулю. Поэтому в подобных случаях правильнее выражать интегральную чувствительность приемника в *а/вт.*

*Глава вторая*

# ФОТОЭЛЕМЕНТЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ВНЕШНЕМ ФОТОЭФФЕКТЕ

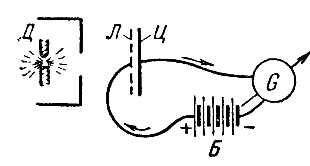
## ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

В 1888 г. профессор Московского университета Александр Григорьевич Столетов осуществил свой знаменитый опыт, сущность которого сводилась к следующему: в электрическую цепь (фиг. 4), состоявшую из батареи *Б* и гальванометра *Г*, были включены расположенные друг против друга два электрода: один —сплошной цинковый *Ц*, другой — в виде латунной сетки *Л*. При освещении электрода *Ц* светом электрической дуги *Д* в цепи возникал постоянный фотоэлектрический ток, который регистрировался гальванометром.

Так было открыто явление, названное Столетовым *актино* *-*электрическим эффектом.*

Дальнейшие исследования показали, что возникновение тока в опыте Столетова объясняется тем, что поверхность освещенного тела (цинковая пластинка в опыте Столетова) испускает отрицательно заряженные частицы — электроны. Выход электронов из поверхностей освещенных тел называется *внешним фотоэффектом* или *фотоэлектронной эмиссией.*

Рассмотрим условия, необходимые для выхода электронов из металла. Металл представляет собой пространственную решетку с сосредоточенными в ее узлах атомами. Последние сравнительно легко теряют электроны, расположенные на внешних электронных оболочках. Возникшие в результате этого свободные электроны движутся между атомами во всевозможных направлениях.




Фиг. 4. Рисунок А. Г. Столетова, поясняющий его опыт.

Электроны, вылетевшие за пределы металла, под действием сил притяжения ближайших ионизированных (потерявших один или несколько электронов) атомов возвращаются внутрь металла. Таким образом, внешняя поверхность металла покрывается плотным слоем электронов, образующих отрицательно заряженный слой. Под действием этого слоя у поверхности металла возникает скачок потенциала, препятствующий выходу электронов наружу.

Чтобы электрон мог преодолеть действие удерживающих его сил и выйти из металла, необходимо сообщить ему дополнительную энергию $W_0$, называемую *работой выхода.* Выраженная в электрон-вольтах работа выхода соответствует энергии, необходимой для перемещения электрона из точки с потенциалом $U_1$ в точку с более высоким потенциалом $U_2$.

Таким образом, работа выхода $W_0 = e\varphi_0$, где $e$ — заряд электрона, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулона (*к*), а $\varphi_0 = U_2 - U_1$ — разность потенциалов, выраженная в вольтах.

Согласно квантовой теории лучистый поток представляет собой поток большого числа мельчайших частиц

---

* От греческого слова „актис“ — луч.

энергии — *квантов* лучистой энергии (называемых также *фотонами*).

Энергия лучистого кванта равна $h\nu$, где $h$ — постоянная Планка, равная $6{,}6 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек., а $\nu$ — частота колебаний лучистого потока. Следовательно, чем больше частота колебаний, тем больше энергия кванта.

Часть квантового потока, упавшего на поверхность металла, поглощается атомами последнего и приобретенная ими энергия идет на увеличение энергии электронов металла. Если энергия кванта превышает работу выхода, то электрон может вылететь за пределы металла.

В результате разности потенциалов, приложенной извне между сплошным электродом — фотокатодом и сетчатым электродом — анодом, вырванные из металла электроны движутся к аноду, и гальванометр регистрирует наличие электрического тока.

Столетов установил, что величина фотоэлектрического тока, т. е. число эмиттируемых с фотокатода электронов, прямо пропорциональна лучистому потоку, падающему на поверхность фотокатода. Этот закон известен как первый закон внешнего фотоэффекта или закон Столетова.

Дальнейшими исследованиями было установлено, что максимальная энергия фотоэлектронов возрастает линейно с частотой $\nu$ падающего света и не зависит от величины лучистого потока. Этот закон известен как второй закон внешнего фотоэффекта или закон Эйнштейна.

Частота света $\nu_{гр}$, при которой энергия фотоэлектронов, вылетающих с поверхности металла, равна нулю, соответствует условию $\nu = \frac{e\varphi_0}{h}$. При частоте $\nu < \nu_{гр}$ энергия фотона меньше работы выхода $e\varphi_0$, в результате чего фотоэффект отсутствует. Поэтому частота $\nu_{гр}$ называется *граничной частотой* или „*красной границей*“ фотоэффекта, а соответствующая частоте $\nu_{гр}$ длина волны $\lambda_{гр} = \frac{1{,}24}{e\varphi_0}$ (где $\lambda_{гр}$ в микронах) называется, *длинноволновым порогом фотоэффекта*.

## СВОЙСТВА ФОТОКАТОДОВ

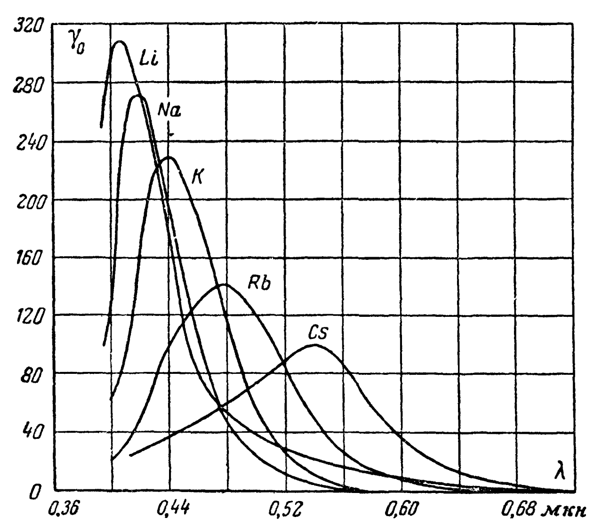
Первоначально в качестве фотокатодов были использованы очищенные от газа металлы. Большинство металлов, обладая большой работой выхода, является малочувствительным и в фотоэлектрическом отношении. Исключение составляют щелочные металлы. Значения работы выхода

для этих металлов представлены в табл. 2, где работа выхода $e\varphi_0$ выражена в электрон-вольтах, а длинноволновый порог $\lambda_{гр}$ — в микронах.

*Таблица 2*

| Щелочные металлы | Химическое обозначение | $e\varphi_0$, *эв* | $\lambda_{гр}$, *мкн* |
|---|---|---|---|
| Литий . . . . . . | Li | 2,47 | 0,50 |
| Натрий . . . . . | Na | 2,28 | 0,54 |
| Калий . . . . . . | K | 2,26 | 0,55 |
| Рубидий . . . . . | Rb | 2,16 | 0,57 |
| Цезий . . . . . . | Cs | 1,90 | 0,65 |

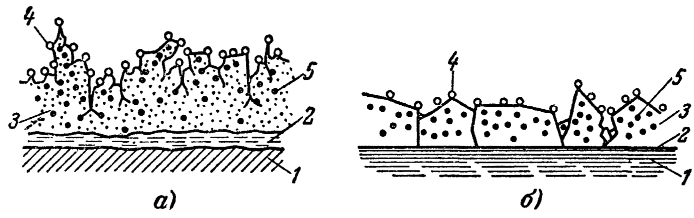
Если с увеличением частоты лучистого потока интенсивность фотоэффекта плавно возрастает, то такой фотоэффект называется *нормальным*. Нормальный фотоэффект наблюдается у большинства чистых металлов, за исключением щелочных металлов и бария.




Фиг. 5. Спектральные характеристики чистых щелочных металлов.

В том случае, когда спектральная характеристика обнаруживает максимум в некоторой части спектра, говорят, что фотокатод обладает *селективным* (*избирательным*) фотоэффектом.

На фиг. 5 приведены спектральные характеристики щелочных металлов, на которых видно расположение селективных максимумов. Было установлено, что значительную роль в появлении селективного максимума играют небольшие количества газа, адсорбированного (поглощенного на поверхности) металлом. Появление селективного максимума имеет место и при адсорбировании атомов щелочных металлов на поверхности нещелочных металлов. При этом одновременно наблюдаются уменьшение работы выхода подобного фотокатода и смещение красной границы в сторону длинных волн. Форма и положение селективного максимума в значительной мере обусловлены условиями оптического поглощения в поверхностном слое.




Фиг. 6. Структура фотокатодов.
*а* — кислородно-цезиевого; *б* — сурьмяно-цезиевого.

Фотокатоды из чистых металлов сейчас почти не применяются. В настоящее время применяются *сложные* фотокатоды, у которых одноатомная пленка щелочного металла (например, цезия) адсорбирована на промежуточном слое, обладающем обычно полупроводниковыми свойствами; сам промежуточный слой нанесен на металлическую или стеклянную подкладку. Наличие одноатомного слоя щелочного металла значительно уменьшает работу выхода фотокатода.

В современных фотоэлементах применяются главным образом кислородно-цезиевые (именуемые также серебряно-кислородно-цезиевыми или просто цезиевыми) и сурьмяно-цезиевые фотокатоды.

На фиг. 6 изображены структуры кислородно-цезиевого и сурьмяно-цезиевого фотокатодов.

Кислородно-цезиевый фотокатод (фиг. 6,*а*) состоит из: серебряной подкладки *1*, слоя окиси серебра, образованного окислением серебра кислородом, *2*, промежуточного слоя, состоящего из окиси цезия и мельчайших частиц восстановленного серебра *3* и адсорбированных на поверх-

ности промежуточного слоя атомов цезия *4*. Промежуточный слой обладает полупроводниковыми свойствами. Кроме того, в промежуточном слое содержится некоторое количество внутренне адсорбированных атомов цезия *5*.

Работа выхода кислородно-цезиевого фотокатода составляет 0,72 *эв*, а его длинноволновый порог равен 1,7 *мкн*. Кислородно-цезиевый фотокатод обладает селективным максимумом в области 0,8 *мкн*, а также рядом максимумов в ультрафиолетовой области.

Сурьмяно-цезиевый фотокатод (фиг. 6,*б*) состоит из: стеклянной или никелевой подкладки *1*, на которой осажден непрозрачный слой металлической сурьмы *2*. В результате термообработки этого слоя в парах цезия образуется промежуточный сурьмяно-цезиевый слой ($SbCs_3$) с рыхлой поверхностью *3*, обладающий полупроводниковыми свойствами. На поверхности этого слоя адсорбированы атомы цезия *4*. Некоторое количество атомов цезия *5* адсорбировано и внутри промежуточного слоя.

Работа выхода сурьмяно-цезиевого фотокатода составляет 1,3 *эв*, а его длинноволновый порог равен 0,7 *мкн*. Селективный максимум этого фотокатода расположен в области 0,3—0,4 *мкн*.

Свойства сложных фотокатодов зависят от технологии их изготовления. Вследствие этого фотоэлементы одного и того же типа могут отличаться по своим характеристикам и параметрам.

Фотоэлементы, основанные на внешнем фотоэффекте, изготовляются двух видов: *вакуумные* и *газонаполненные*. Оба вида фотоэлементов в процессе их изготовления откачиваются до высокого вакуума, причем во время откачки принимаются меры по удалению небольших количеств газа, содержащегося в порах металла.

Достигается это путем термообработки фотокатода в процессе откачки. В частности, быстрое удаление газа осуществляется путем прерывистого интенсивного нагревания фотокатода.

С целью обеспечения усиления фототока самим фотоэлементом внутрь газонаполненного фотоэлемента вводится небольшое количество инертного газа, например аргона.

При своем движении к аноду фотоэлектроны сталкиваются с атомами инертного газа, ионизируя некоторые из них. Появившиеся в результате ионизации дополнительные свободные электроны совместно с фотоэлектронами движутся в ускоряющем поле по направлению к аноду. Со-

вместно с фотоэлектронами эти дополнительные электроны участвуют в новых столкновениях с атомами инертного газа, ионизируют их, увеличивая, таким образом, общее число свободных электронов. Процес столкновений электронов с атомами инертного газа повторяется многократно, в результате чего к аноду движется лавина электронов, а от анода к фотокатоду — лавина положительных ионов. В итоге ток анода $I_a$ будет больше тока фотокатода $I_ф$ в $\delta = \frac{I_a}{I_ф}$ раз. Величина $\delta$ называется *коэффициентом газового усиления* газонаполненного фотоэлемента. Коэффициент газового усиления зависит от величины приложенного напряжения, давления и рода газа, а также от конструкции фотоэлемента.

Газонаполненные фотоэлементы, обладая вследствие наличия газового усиления большей чувствительностью, уступают вакуумным фотоэлементам по другим важным показателям (см. ниже).

## КОНСТРУКЦИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТА

Фотоэлемент, основанный на внешнем фотоэффекте, представляет собой стеклянный баллон сферической или каплеобразной формы со впаянными в него двумя электродами, к которым внутри баллона присоединены фотокатод и анод.

На внутреннюю поверхность баллона нанесен фотокатод, светочувствительная поверхность которого обращена внутрь баллона. Анод чаще всего представляет собой небольшое кольцо (или диск) из никеля, расположенное в центре баллона и присоединенное к анодному выводу.

Оба электрода фотоэлемента должны быть хорошо изолированы один относительно другого. С этой целью в некоторых фотоэлементах электроды анода и фотокатода выведены в противоположные стороны. С внешней стороны баллона электроды фотоэлемента присоединяются к металлическим колпачкам либо к штырькам, расположенным на прикрепленном к баллону цоколе.

## ВАЖНЕЙШИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ И ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Если направить на фотоэлемент луч неразложенного света, то прибор, включенный в его внешней цепи, зарегистрирует фототок $I = \gamma F$, где $F$ — световой поток,

падающий на фотокатод, а $\gamma$ — *интегральная чувствительность фотоэлемента*. Интегральная чувствительность вакуумных и газонаполненных фотоэлементов обычно измеряется в *мка/лм*. Величина интегральной чувствительности вакуумных фотоэлементов в зависимости от вида фотоэлемента имеет значения от нескольких до 100 *мка/лм*.

Спектральная чувствительность $\gamma_\lambda$, характеризуемая числом квантов, необходимых для вырывания одного электрона, называется *квантовой эффективностью фотокатода* и измеряется в *электрон/квант*.

$$1 \text{ электрон/квант} = 8{,}06 \cdot 10^3 \lambda \text{ а/вт}$$

и, обратно,

$$1 \text{ а/вт} = 1{,}24 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^{-1} \frac{\text{электрон}}{\text{квант}},$$

где $\lambda$ в сантиметрах.

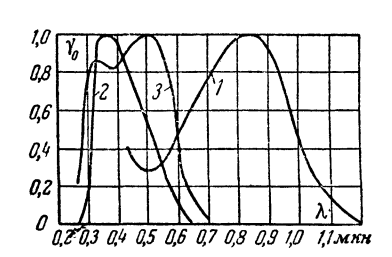
Разлагая видимый свет в спектр посредством монохроматора или другого спектрального прибора и пропуская через узкую выходную щель монохроматический пучок света на фотокатод, можно определить зависимость фототока от длины волны. Характеристика фотоэлемента, выражающая зависимость относительной чувствительности или фототока от длины волны, называется *спектральной характеристикой фотоэлемента*.

На фиг. 7 показаны спектральные характеристики наиболее распространенных фотоэлементов, основанных на внешнем фотоэффекте. Кривая *1* относится к кислородно-цезиевому фотокатоду, нанесенному на серебряную подкладку. Длинноволновый максимум у этого катода лежит при 0,85 *мкн*. Кривая *2* является спектральной характеристикой сурьмяно-цезиевого фотокатода, нанесенного на металлическую подкладку (никель), кривая *3* — характеристика полупрозрачного сурьмяно-цезиевого фотокатода, нанесенного на стекло баллона. Эти кривые имеют максимумы при 0,36 и 0,5 *мкн*.

Чтобы все электроны, эмиттируемые фотокатодом, достигли анода, он должен иметь достаточно большое положительное напряжение относительно катода. Как видно из фиг. 8, на которой показаны вольтамперные характеристики вакуумных фотоэлементов, улавливание всех эмиттированных катодом электронов наступает при анодном напряжении, равном 30—70 *в*, в зависимости от величины

светового потока. Режим работы вакуумного прибора, при котором все электроны с катода доходят до анода, называется *режимом насыщения*, а соответствующее этому режиму анодное напряжение — *напряжением насыщения*.

Требуемое напряжение насыщения тем больше, чем больше световой поток, падающий на фотокатод. Наибольшая величина нагрузочного сопротивления, которое может быть включено в анодную цепь фотоэлемента, определяется из вольтамперной характеристики при заданном значении светового потока. Так, например, если э. д. с. источни-




Фиг. 7. Спектральные характеристики кислородно-цезиевого и сурьмяно-цезиевого фотокатодов.

Фиг. 8. Вольтамперные характеристики вакуумных фотоэлементов для нескольких значений светового потока.

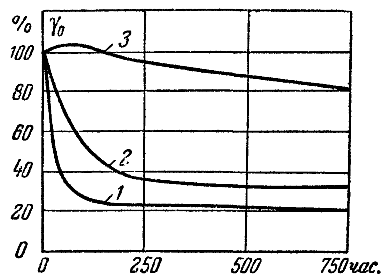
ка питания равна 200 *в*, то при световом потоке, равном 0,1 *лм*, и напряжении насыщения 50 *в* (при этом ток насыщения равен 10 *мка*) величина нагрузочного сопротивления не должна превышать $R = \frac{200-50}{10 \cdot 10^{-6}} = 15$ *мгом*.

Характеристика, определяющая зависимость фототока от светового потока (или освещенности), называется *световой характеристикой*. Световые характеристики вакуумных фотоэлементов имеют линейный характер вплоть до сравнительно больших значений светового потока. Так, например, для сурьмяно-цезиевых фотоэлементов зависимость фототока от светового потока имеет линейный характер вплоть до 0,5 *лм*. Характеристики и параметры фотоэлементов подвержены изменению, которое наблюдается как во время хранения фотоэлемента, так и в процессе его работы. При хранении возможны изменения чувствительности. Причиной этих изменений являются, повидимому, физико-химические процессы на поверхности фотокатода. Эти процессы неконтролируемы и носят случайный характер. Они наиболее заметны у кислородно-цезиевых фотоэлементов.

Чтобы уменьшить роль этих изменений, фотоэлементы после изготовления подвергают специальной выдержке в течение некоторого времени.

Если фотоэлемент непрерывно находится под действием света и напряжением, то наблюдается понижение его чувствительности, называемое *утомляемостью фотоэлемента.* Чем больший световой поток падает на фотоэлемент в процессе его работы, тем сильнее его утомляемость.

На фиг. 9 приведены кривые утомляемости в условиях непрерывной работы. Наибольшая утомляемость у кислородно-цезиевых фотоэлементов наблюдается на протяжении первых 100—150 час. работы. Утомляемость фотоэлемента является почти обратимым процессом. Это значит, что после достаточно длительного отдыха чувствительность фотоэлемента почти полностью восстанавливается. При освещении фотоэлемента, находящегося под напряжением, чрезмерно большим световым потоком его чувствительность может резко понизиться, причем этот процесс окажется уже необратимым вследствие разрушения фотокатода. У фотоэлементов с кислородно-цезиевым фотокатодом линейность световой характеристики нарушается вследствие возрастания утомляемости фотокатода с ростом светового потока, что приводит к понижению чувствительности фотоэлемента.




Фиг. 9. Кривые утомляемости фотоэлементов в условиях непрерывной работы.

1 — кислородно-цезиевый газонаполненный; 2 — кислородно-цезиевый вакуумный; 3 — сурьмяно-цезиевый вакуумный.

*Частотная характеристика* устанавливает зависимость переменной составляющей напряжения, падающего на нагрузочном сопротивлении фотоэлемента, от частоты модуляции светового потока. Для снятия частотной характеристики фотоэлемент освещают световыми импульсами прямоугольной формы, для которых известны спектральный состав, амплитуда и частота. Сохраняя неизменными спектральный состав излучения и величину потока (т. е. амплитуду), плавно изменяют частоту модуляции, определяя зависимость переменной составляющей напряжения от частоты модуляции. Вакуумные фотоэлементы являются почти безинерционными приборами. Поэтому они преобра-

зуют световые импульсы в электрические практически без всяких искажений. Лишь при значительном повышении частоты наблюдается понижение частотной характеристики. Это понижение вызывается электрическими параметрами схемы фотоэлемента — его собственной емкостью и емкостью монтажа, а также величиной нагрузочного сопротивления.

В тех случаях, когда приходится иметь дело со слабыми световыми потоками, в особенности при их измерении, необходимо считаться с величиной темнового тока. *Темновым током фотоэлемента* называется ток, текущий через фотоэлемент, когда последний полностью затемнен. Темновой ток состоит из двух составляющих: термотока, вызванного термоэлектронной эмиссией фотокатода, и тока утечки.

Вследствие того что при комнатной температуре термоэлектронная эмиссия достигает $10^{-12}$—$10^{-15}$ *а* с 1 *см*$^2$ поверхности фотокатода, в большинстве случаев термотоком можно пренебречь по сравнению с током утечки.

*Ток утечки* определяется как объемной, так и поверхностной проводимостями стекла баллона и цоколя фотоэлемента. Ток утечки прямо пропорционален величине рабочего напряжения. Именно этот ток и определяет обычно величину темнового тока вакуумного фотоэлемента. У стандартных вакуумных фотоэлементов он достигает $10^{-7}$—$10^{-8}$ *а*. Ток утечки обусловлен главным образом оседанием влаги на внешней поверхности стеклянного баллона и цоколя.

Как и электронная лампа, фотоэлемент является источником собственных помех. Напряжение, создаваемое этими помехами, после его усиления будучи прослушанным на телефон или громкоговоритель, воспринимается как шум. Поэтому говорят о шуме фотоэлемента.

Причины шума фотоэлемента обусловлены тем, что термоток и фототок представляют собой поток большого числа отдельных электронов. Числа электронов, одновременно достигающих анода, в отдельные короткие промежутки времени неодинаковы; неравномерность их поступления на анод и воспринимается как шум.

Повышение температуры относительно комнатной (18—20° С) до 50° С приводит к понижению чувствительности сурьмяно-цезиевого фотоэлемента на несколько процентов (3—4%), а у кислородно-цезиевого фотоэлемента — на несколько десятков процентов. Понижение температуры так-

же ведет к понижению чувствительности фотоэлемента, более значительному, чем в случае ее повышения.

Изменение температуры существенным образом влияет на величину термотока. Повышение температуры на каждые 10° С увеличивает, а соответственное понижение ее — уменьшает приблизительно вдвое величину термотока сурьмяно-цезиевого фотоэлемента. Изменение температуры кислородно-цезиевого фотоэлемента более резко сказывается на величине его термотока.

Понижением термотока путем охлаждения фотоэлемента пользуются в тех случаях, когда величина термотока ограничивает возможность измерения слабого светового потока.

Как было указано, для увеличения чувствительности некоторые типы фотоэлементов наполняют инертным газом. Рассмотрим особенности характеристик и параметров газонаполненных фотоэлементов.

Чувствительность газонаполненных фотоэлементов приблизительно в 4—5 раз больше чувствительности однотипных вакуумных фотоэлементов. Однако при длительной непрерывной работе их чувствительность резко понижается, достигая значений, близких к чувствительности вакуумных фотоэлементов. Так, например, при освещении кислородно-цезиевых газонаполненных фотоэлементов световыми потоками порядка 0,005—0,01 *лм* в течение 700 час. их чувствительность понижается со 100 до 25 *мка/лм*.

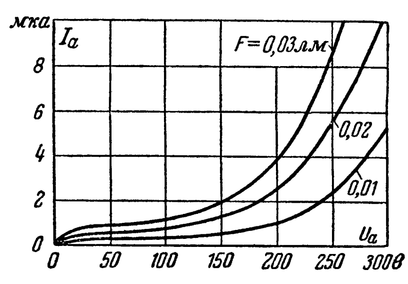
Причина резкого падения чувствительности газонаполненных фотоэлементов объясняется утомляемостью и необратимым изменением структуры фотокатода вследствие бомбардировки катода ионизированными атомами газа. Кривая *1* на фиг. 9 изображает среднюю кривую утомляемости газонаполненного кислородно-цезиевого фотоэлемента в условиях непрерывной работы.

В отличие от характеристик вакуумных фотоэлементов вольтамперные характеристики газонаполненных фотоэлементов не имеют участка насыщения (фиг. 10).

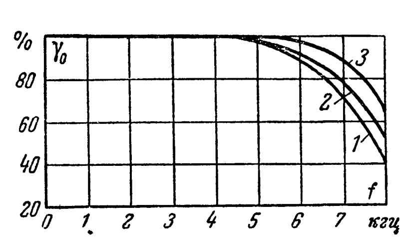
Из кривых фиг. 10 следует, что крутизна характеристики газонаполненного фотоэлемента зависит от рабочего напряжения и величины светового потока.

Чем больше анодное напряжение, тем больше крутизна характеристики. Так как на нагрузочном сопротивлении падает часть рабочего напряжения источника питания, крутизна характеристики зависит также от величины нагрузочного сопротивления.

При значительном повышении рабочего напряжения газонаполненного фотоэлемента наблюдается резкий подъем вольтамперной характеристики. Анодный ток резко возрастает — в фотоэлементе развивается так называемый «самостоятельный» разряд, не управляемый световым потоком. При этом возникает свечение газа во всем объеме фотоэлемента. Напряжение, при котором возникает резкое изменение анодного тока и наступает свечение газа в фотоэлементе, называется *напряжением зажигания.* Нормальная работа газонаполненного фотоэлемента возможна лишь при отсутствии свечения, так как с появлением свечения




Фиг. 10. Вольтамперные характеристики газонаполненного фотоэлемента при разных значениях светового потока.




Фиг. 11. Частотные характеристики газонаполненных фотоэлементов.

*1* — ЦГ-1; *2* — ЦГ-2; *3* — ЦГ-3.

фотоэлемент перестает реагировать на изменение светового потока, а катод его быстро разрушается интенсивной ионной бомбардировкой.

Световые характеристики газонаполненного фотоэлемента имеют более короткий линейный участок, чем у вакуумных фотоэлементов. Протяженность линейного участка световой характеристики у газонаполненных фотоэлементов уменьшается с увеличением падения напряжения на фотоэлементе.

Газонаполненные фотоэлементы обладают заметной инерцией. Если освещать газонаполненный фотоэлемент световыми импульсами прямоугольной формы и регистрировать электронным осциллографом изменение фототока, то легко убедиться, что возрастания и спадания фототока не следуют за изменениями светового потока. По мере повышения частоты световых импульсов импульсы фототока приобретают пилообразную форму, а их амплитуда понижается. Инерция газонаполненных фотоэлементов объясняется двумя причинами: замедленной по сравнению

с электронами подвижностью положительных ионов и выбиванием из фотокатода вторичных электронов положительными ионами.

На фиг. 11 приведены частотные характеристики нескольких типов кислородно-цезиевых газонаполненных фотоэлементов. Частотные характеристики были сняты при следующих условиях: световой поток 0,04 *лм*, рабочее напряжение 240 *в*, нагрузочное сопротивление 5 000 *ом*.

В газонаполненных фотоэлементах наряду с усилением фототока происходит усиление термотока. Особенно заметен рост термотока с увеличением падения напряжения на фотоэлементе. Увеличение светового потока и особенно падения напряжения на газонаполненном фотоэлементе приводит к резкому возрастанию шумов.

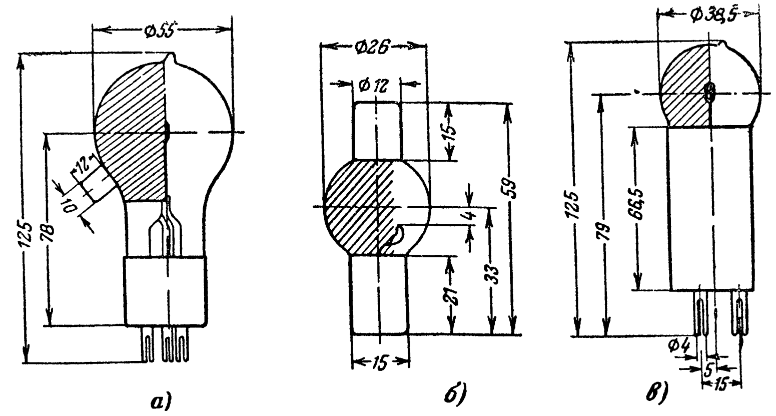
Рассмотренные выше недостатки газонаполненных фотоэлементов не могут быть компенсированы их основным преимуществом — более высокой чувствительностью. С появлением однокаскадных фотоумножителей (см. гл. 3) область применения газонаполненных фотоэлементов значительно уменьшилась.

## ТИПОВЫЕ ДАННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Вакуумные и газонаполненные фотоэлементы уже много лет изготовляются отечественной промышленностью. В настоящее время выпускаюся вакуумные фотоэлементы с кислородно-цезиевым (ЦВ) и сурьмяно-цезиевым (СЦВ) фотокатодами, а также кислородно-цезиевые газонаполненные (ЦГ) фотоэлементы. На фиг. 12 приведены три основных варианта конструктивного оформления этих фотоэлементов. В варианте *а* показана конструкция фотоэлементов типов ЦВ-1 и ЦГ-1. В этих фотоэлементах электрод фотокатода выведен в виде металлического цоколя, расположенного сбоку на стеклянном баллоне; электрод анода присоединен к металлическому штырьку с надписью «Анод», расположенному на четырехштырьковом ламповом цоколе.

В варианте *б* показана конструкция фотоэлементов типов ЦВ-3, ЦГ-3 и СЦВ-3. В этой конструкции фотокатод соединен с верхним, меньшим по размерам; цоколем, а анод — с нижним. Фотоэлемент марки СЦВ-51 оформлен так же, как и СЦВ-3, однако размеры баллона и верхнего цоколя у него несколько больше изображенных в варианте *б*.

Фотоэлементы типов ЦВ-4, ЦГ-4 и СЦВ-4 имеют конструктивное оформление, представленное вариантом *в*. В этих фотоэлементах стеклянный баллон укреплен на ци-




Фиг. 12. Конструктивные данные и размеры основных типов отечественных фотоэлементов.

линдрическом цоколе с двумя металлическими штырьками, соединенными с фотокатодом и анодом. Штырек, расположенный со стороны окна фотоэлемента, соединен с анодом, а задний — с фотокатодом.

Важнейшие данные отечественных фотоэлементов приведены в табл. 3.

*Таблица 3*

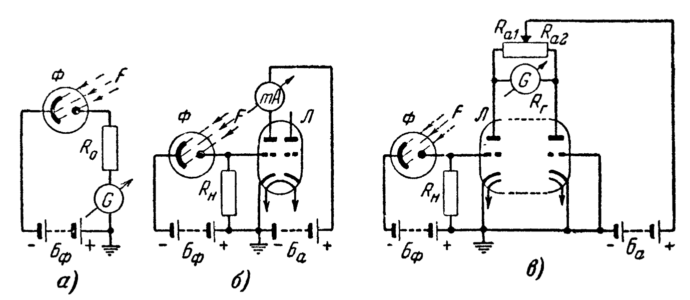
| Вид фотоэлемента | Тип | Минимальная чувствительность, *мка/лм* | Минимальное значение чувствительности после непрерывной работы в течение 700—1 000 час., *мка/лм* | Темновой ток (максимальное значение), *а* | Максимальное снижение частотной характеристики в полосе 300—8 000 *гц*, *дб* | Цоколевка фотоэлемента (фиг. 16) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Кислородно-цезиевый вакуумный . . . . . | ЦВ-1 | 20 | — | $1 \cdot 10^{-7}$ | — | *а* |
| То же . . . . . . . | ЦВ-3 | 20 | — | $1 \cdot 10^{-7}$ | — | *б* |
| То же . . . . . . . | ЦВ-4 | 20 | — | $1 \cdot 10^{-7}$ | — | *в* |
| Сурьмяно-цезиевый вакуумный . . . . . | СЦВ-3 | 80 | 60 | $1 \cdot 10^{-8}$ | —3 | *б* |
| То же . . . . . . . | СЦВ-4 | 80 | 60 | $1 \cdot 10^{-7}$ | —3 | *в* |
| То же . . . . . . . | СЦВ-51 | 80 | 60 | $1 \cdot 10^{-8}$ | —3 | *б* |
| Кислородно-цезиевый газонаполненный . . | ЦГ-1 | 75 | 25 | $1 \cdot 10^{-7}$ | —7 | *а* |
| То же . . . . . . | ЦГ-3 | 100 | 25 | $1 \cdot 10^{-7}$ | —5 | *б* |
| То же . . . . . . . | ЦГ-4 | 100 | 25 | $1 \cdot 10^{-7}$ | —7 | *в* |

Рабочее напряжение для всех фотоэлементов 240 *в*.

## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Простейшая схема включения вакуумного фотоэлемента показана на фиг. 13,*а*. Включаемый в этом случае гальванометр должен обладать большой чувствительностью $S_i$ ($S_i = \frac{\alpha}{I}$, где $\alpha$ — число делений, а $I$ — ток в *а*).

Фототоки, получающиеся в цепи вакуумного или газонаполненного фотоэлемента, даже при сравнительно боль-




Фиг. 13. Простейшие схемы включения вакуумного фотоэлемента.

ших значениях потока, облучающего фотокатод, столь малы, что они большей частью не могут быть измерены зеркальным гальванометром.

Действительно, если принять чувствительность фотоэлемента ЦГ-3 $\gamma = 100$ *мка/лм*, а световой поток $F = 1 \cdot 10^{-5}$ *лм*, то фототок составит лишь $I_ф = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-5} = 10^{-9}$ *а*. Если токовая постоянная гальванометра $C_i = 1 \cdot 10^{-9}$ *а*, то ток, равный $1 \cdot 10^{-9}$ *а*, вызовет перемещение светового зайчика лишь на одно деление. Следовательно, не только для задач автоматики, но даже для измерительных целей требуется предварительное усиление фототока.

Сопротивление $R_0$, включенное последовательно с гальванометром, называется *охранным сопротивлением*. Оно предназначено для предохранения гальванометра от повреждения при внезапном возникновении в фотоэлементе газового разряда. Величина этого сопротивления обычно порядка 1 — 10 *мгом*.

Чувствительность фотоэлемента при отсутствии в его цепи высокоомной нагрузки $R_н$ либо при $R_н \ll R_{iф}$, где $R_{ic}$ — внутреннее сопротивление фотоэлемента, называется *статической чувствительностью фотоэлемента* $\gamma_c$. (Здесь под $\gamma_c$ подразумеваются как интегральная $\gamma$, так и спек-

тральная $\gamma_\lambda$ чувствительности фотоэлемента.) При $R_н$, соизмеримом с $R_{iф}$, следует учитывать *динамическую чувствительность фотоэлемента* $\gamma_д = \frac{\gamma_c}{1 + R_н/R_{iф}}$. Обычно, однако, $R_н \ll R_{iф}$ и $\gamma_д = \gamma_c$.

Для усиления фототока часто применяются усилители тока. Принципиальная схема усилителя фототока показана на фиг. 13,*б*. В результате протекания фототока $I_ф$ по сопротивлению нагрузки $R_н$ на последнем падает напряжение $\Delta U = I_ф R_н$. В усилителе постоянного тока это напряжение подается на управляющую сетку усилительной лампы. Если усилителем является триод со статической крутизной $S$, а в анодную цепь триода включено сопротивление $R_a$, то анодный ток $I_a$ изменится на величину $\Delta I_a = \Delta US \cdot \frac{1}{1 + R_a/R_i}$, где $R_i$ — внутреннее сопротивление лампы. При $R_a \ll R_i$ $\Delta I_a \doteq \Delta US$. Здесь $S$ выражено в *а/в*. Когда $S$ выражено в *ма/в*, $\Delta I_a = 1\,000\ \Delta US$. Таким образом, чем больше крутизна лампы, тем больше коэффициент усиления по току $K_i = \frac{\Delta I_a}{I_ф}$.

Допустим, что фототок $I_ф = 10^{-9}$ *а*. Тогда при $R_н = 10^7$ *ом* = 10 *мгом* $\Delta U = 0{,}1$ *в*. Пусть для усиления использован двойной триод 6Н8С, который при $U_a = 90$ *в* и $U_c = 0$ *в* имеет $S = 3{,}0$ *ма/в*; $R_i = 6\,700$ *ом*. Пусть $R_a = 10$ *ком*. Тогда коэффициент усиления по току $K_i = 10^7 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-3} = 1{,}2 \cdot 10^4$ и, следовательно, $\Delta I_a = 10^{-9} \cdot 1{,}2 \cdot 10^4 = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ *а*.

Очевидно, при анодном токе, равном 10 *ма*, мы не сможем на миллиамперметре, регистрирующем анодный ток триода, зафиксировать изменение анодного тока, равное 12 *мка*. Чтобы зарегистрировать ток подобной величины, обычно применяют мостовую схему, где в диагонали моста расположен гальванометр.

Примером мостовой схемы является схема, изображенная на фиг. 13,*в*. При отсутствии фототока мост балансируют регулировкой потенциометра, изменяющего соотношение плеч $R_{a1}/R_{a2}$, добиваясь баланса моста, т. е. такого положения, чтобы ток гальванометра $I_г = 0$. Изменение анодного тока на величину $\Delta I_a$ вызывает нарушение баланса моста—мост становится *разбалансированным, неуравновешенным*; ток $\Delta I_a$ течет через две параллельные нагрузки: $R_{a1}$ и $R_г + R_{a2}$, где $R_г$ — сопротивление гальва-

нометра. Если $R_г \ll R_{a2}$, то так как $R_{a1} \approx R_{a2}$, через гальванометр течет лишь ток $\sim \frac{\Delta I_a}{2} = I_г$. Следовательно, коэффициент усиления мостовой схемы по току

$$K_i = \frac{I_г}{I_{ф}} = \frac{\Delta U S_d}{2} = \frac{S_d R_н}{2},$$

где $S_d$ — динамическая крутизна, выраженная в *а/в*, либо

$$k = 500 S_d R_н,$$

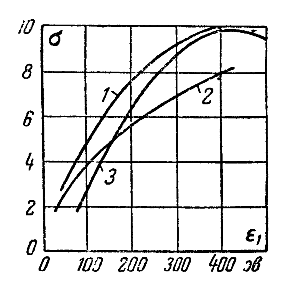
где $S_d$—в *ма/в*.

*Глава третья*

# ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

## ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Если направить пучок быстрых электронов на поверхность металла, полупроводника или диэлектрика, то можно обнаружить встречный поток так называемых «вторичных электронов». Установлено, что вторичные электроны появляются в результате выбивания их первичными электронами не только с поверхности тела, но и из его глубины.




Фиг. 14. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии первичных электронов для эмиттеров.

*1* — кислородно-цезиевого; *2* — сурьмяно-цезиевого; *3* — из сплава серебра с магнием.

Выход с поверхности тел вторичных электронов, происходящий в результате бомбардировки этих тел первичными электронами, называется *вторично-электронной эмиссией* или, кратко, *вторичной эмиссией*, а тело, из которого вылетают вторичные электроны, — *вторично-электронным эмиттером* или, кратко, *эмиттером*.

Отношение числа вторичных электронов $n_2$ к числу первичных электронов $n_1$ $\sigma = \frac{\bar{n}_2}{n_1}$ называется *коэффициентом вторичной эмиссии.*

Коэффициент вторичной эмиссии существенно зависит от энергии первичных электронов.

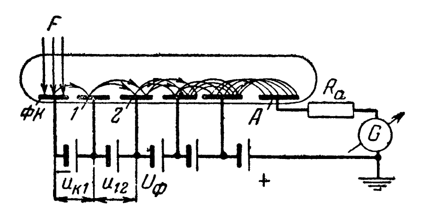
На фиг. 14 показана зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии первичных электронов, выражен-

ной в электрон-вольтах (*эв*), для ряда сложных эмиттеров.

Приведенные графики показывают, что вначале, по мере увеличения энергии первичных электронов, коэффициент вторичной эмиссии растет. В дальнейшем, с ростом энергии первичных электронов, вторичные электроны вырываются со все большей глубины эмиттера и при продвижении их к поверхности эмиттера теряют бо́льшую часть своей энергии. Поэтому при некотором значении энергии первичных электронов коэффициент вторичной эмиссии достигает максимального значения $\sigma_{макс}$, после чего он постепенно уменьшается. Для различных чистых металлов значения $\sigma_{макс}$ лежат в пределах 0,5 — 1,8. В фотоумножителях обычно применяются сложные эмиттеры, $\sigma_{макс}$ которых достигает 8 — 12.

## ПРИНЦИП ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖЕНИЯ

Если в вакуумной колбе расположены фотокатод, ряд эмиттеров и анод и они присоединены к секционированной высоковольтной батарее таким образом, как это показано на фиг. 15, то будет наблюдаться следующая картина: первичные электроны, вылетевшие с фотокатода *ФК*, ускоренные напряжением $u_{к1}$, бомбардируют эмиттер *1*, выбивая из него в $\sigma$ раз большее число вторичных электронов. В свою очередь электроны, выбитые из эмиттера *1*, будучи ускоренными напряжением $u_{12}$, бомбардируют эмиттер *2*, вырывая из него в $\sigma$ раз большее число электронов. Если число эмиттеров равно $n$, то с $n$-ного эмиттера на анод попадет в $\sigma^n$ раз больше электронов, чем с фотокатода на первый эмиттер. В действительности всегда имеет место некоторое рассеяние электронов, в результате чего на следующий эмиттер попадают не все вторичные электроны. Число вторичных электронов в $m$ раз больше числа электронов, бомбардирующих эмиттер, где $m \leqslant \sigma$. Если при освещении фотокатода световым пото-




Фиг. 15. Рисунок, поясняющий принцип вторично-электронного умножения.

ком $F$ его фототок равен $i_ф$, то ток анода будет: $I_ф = i_ф m^n$. Таким образом, ток возрастет в $m^n$ раз.

Рассмотренный выше принцип называется *принципом вторично-электронного умножения*, а основанные на нем электровакуумные приборы называются *вторично-электронными умножителями* или просто *электронными умножителями*.

Если в электронном умножителе источником первичных электронов является фотокатод, то такой прибор называется *фотоэлектронным умножителем* (ФЭУ) или *фотоумножителем*.

## КОНСТРУКЦИИ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Конструкции фотоумножителей в первую очередь определяются формой и размерами фотокатода и способом концентрации и направления электронных пучков, т. е. *фокусировкой* электронов.

В современных фотоумножителях, как правило, применяется электростатическая фокусировка электронов. В качестве вторично-электронных эмиттеров применяются сложные эмиттеры, нанесенные на никелевые электроды корытообразной формы, либо корытообразные электроды, выполненные из специальных сплавов, обладающих большим коэффициентом вторичной эмиссии. Эмиттеры должны обладать хорошей *температуроустойчивостью*, т. е. допускать рассеивание на них сравнительно большой мощности без изменения своих эмиссионных свойств, что важно для обеспечения постоянства параметров фотоумножителя.

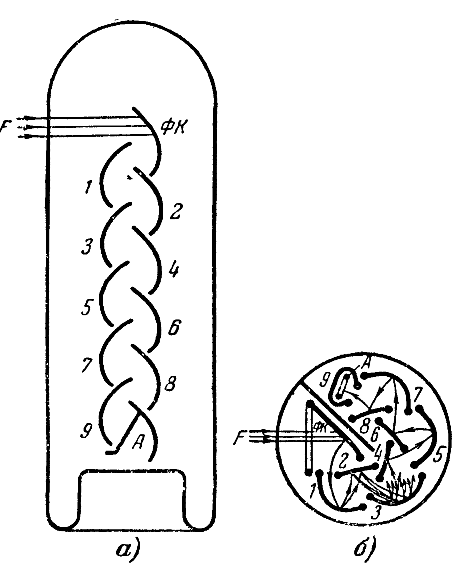
Исследования форм электрических полей, проведенные методами механического и электролитического моделирования, позволили установить наивыгоднейшую форму электродов и их взаимное расположение, при которых условия фокусировки электронов будут оптимальными, а рассеяние электронов — минимальным.

На фиг. 16 приведены две наиболее распространенные формы расположения электродов: вариант *а* — продольное и вариант *б* — радиальное расположение корытообразных электродов.

В варианте *а* световой поток $F$ через окно стеклянного баллона попадает на фотокатод *ФК*. Вылетающие из катода электроны собираются эмиттером *1*. Вторичные электроны, вылетающие из эмиттера *1*, бомбардируют эмиттер *2* и выбивают из него вторичные электроны, которые в свою очередь бомбардируют эмиттер *3*, и т. д. В варианте *б*

электроны также последовательно переходят с эмиттера на эмиттер. В радиальном варианте корытообразную форму имеют лишь внешние эмиттеры, а анод *А* выполнен в виде проволочной петли, окруженной последним эмиттером (*9*). В современных фотоумножителях, как и в вакуумных фотоэлементах, применяются главным образом кислородно-цезиевые или сурьмяно-цезиевые фотокатоды, нанесенные на металлическую подкладку, или полупрозрачные фотокатоды, нанесенные с внутренней стороны на стекло баллона. Рабочие поверхности фотокатодов электронных умножителей имеют размеры от нескольких десятых до 100 *см*$^2$.

В настоящее время применяются сурьмяно-цезиевые или кислородно-бериллиевые эмиттеры, нанесенные на металлические пластины, а также кислородно-магниевые эмиттеры, образованные окислением при термической обработке серебряно-магниевого сплава, и ряд других. При выборе эмиттера существенное внимание уделяется величине коэффициента вторичной эмиссии, имеющей место при заданном напряжении, температуроустойчивости и величине термоэлектронной эмиссии, которая должна быть ничтожно малой.




Фиг. 16. Наиболее распространенные формы расположения корытообразных электродов в фотоумножителях.

По числу вторично-электронных эмиттеров фотоумножители делятся на мало- и многокаскадные. Простейшими среди малокаскадных фотоумножителей являются однокаскадные. Многокаскадные фотоумножители содержат обычно девять и более каскадов.

Фотоумножители с электростатической фокусировкой конструктивно выполняются в виде многоэлектродной лампы, у которой фотокатод, эмиттеры, а иногда и анод под-

соединены к штырькам на цоколе лампы. У большинства фотоумножителей анод выведен отдельно на баллон с целью уменьшения тока утечки. В некоторых фотоумножителях и фотокатод выведен на баллон лампы.

## ВАЖНЕЙШИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Выше было показано, что анодный (выходной) ток умножителя больше фототока катода в $m^n$ раз. Величина $M = m^n$, называемая *коэффициентом усиления умножителя*, является его важнейшим параметром.

Напряжение, питающее фотоумножитель, $U_ф = U + U_a$, где $U_a$ — напряжение между анодом и последним каскадом, а $U$ — напряжение между фотокатодом и последним каскадом. $U = nu_к$, где $u_к$ — каскадное напряжение. Так как выходной ток умножителя равен $I_ф = i_ф M$, то *интегральная чувствительность умножителя* может быть представлена как $\gamma_ф = \gamma M = \frac{I_ф}{F}$, где $\gamma$ — чувствительность фотокатода. Вместо вольтамперной характеристики, выражающей зависимость тока $I_ф$ от напряжения $U_ф$, обычно строят графически зависимость $M$ или $\gamma_ф$ от напряжения $U_ф$.

На фиг. 17 приведена зависимость $M$ от напряжения $U_ф$. Там же показана зависимость *темнового тока фотоумножителя* $I_m$ от напряжения $U_ф$: $I_m \approx i_m M + I_у$, где $i_m$ — термоток фотокатода, а $I_у$ — ток утечки, определяемый сопротивлением изоляции анода и анодным напряжением $U_a$. Как и в случае вакуумных фотоэлементов, величина анодного напряжения $U_a$ должна быть такой, чтобы имел место ток насыщения.

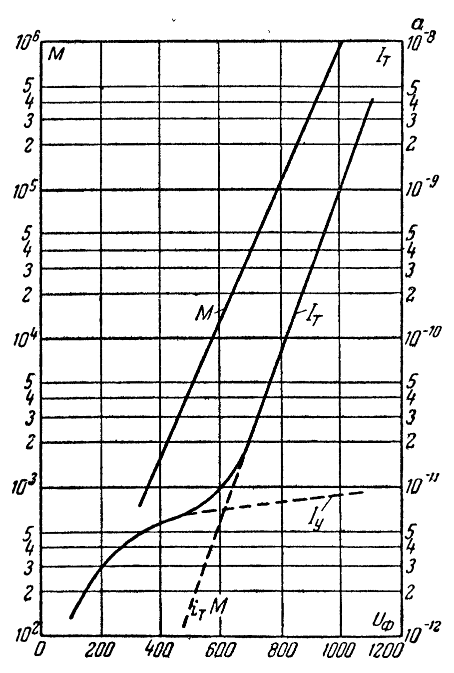
Величина сопротивления изоляции анода определяется отчасти объемным сопротивлением стекла, и, главным образом проводимостями по внутренней и внешней сторонам баллона.

На фиг. 17 пунктиром показаны продолжения кривых термотока и тока утечки, по которым можно судить о том, какая из составляющих темнового тока при данном напряжении имеет бóльшую величину.

В зависимости от числа каскадов, величины коэффициента вторичной эмиссии и значения ускоряющего напря-

жения коэффициент усиления многокаскадного умножителя обычно достигает величин порядка $10^4$—$10^6$. При определенных условиях удавалось доводить коэффициент усиления умножителя до $10^8$—$10^9$.

Ввиду большой величины коэффициента усиления многокаскадного фотоумножителя его интегральная чувствительность обычно измеряется в *а/лм*. Из этого, однако, не следует делать вывод, что, облучая фотокатод умножителя потоком порядка 1 *лм*, можно получить анодный ток, измеряемый амперами. Несмотря на то, что катод фотоумножителя по утомляемости практически не отличается от катода вакуумного фотоэлемента, максимальный световой поток, которым может быть облучен катод фотоумножителя, обычно не превышает $10^{-5}$—$10^{-4}$ *лм*. Эта величина определяется интегральной чувствительностью и максимальным, допустимым для данного фотоумножителя анодным током. Последний имеет обычно величину порядка 0,1—1,0 *ма* в зависимости от типа эмиттера. Даже при указанных выше значениях анодного тока, уже заметным образом сказывается утомляемость фотоумножителя. Поэтому, там где необходима большая точность измерений, максимальный анодный ток ограничивают величиной порядка 0,1—1 *мка*.




Фиг. 17. Зависимость коэффициента усиления $M$ и величины темнового тока $I_m$ от напряжения $U_ф$.

Как видно на фиг. 17, повышение коэффициента усиления может быть достигнуто за счет увеличения питающего напряжения. Однако, начиная с некоторой величины напряжения, темновой ток фотоумножителя резко возра-

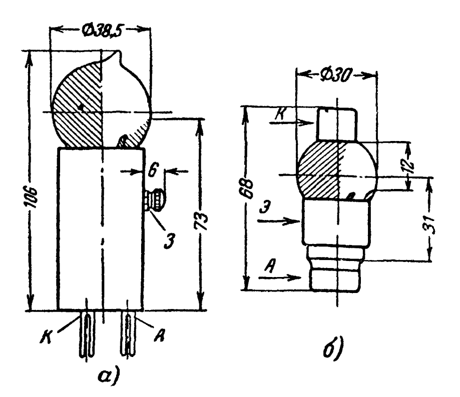
стает и становится нестабильным. Последнее обстоятельство имеет место вследствие оптической и ионной обратных связей, возникающих внутри фотоумножителя.

Световая характеристика фотоумножителя имеет линейный характер в широком интервале значений светового потока. Использование фотоумножителя в случае больших световых потоков ограничивается током, при котором заметно сказывается утомляемость фотоумножителя, а при малых световых потоках — величиной темнового тока и создаваемыми им шумами.

Спектральная и частотная характеристики фотоумножителя почти не отличаются от соответствующих характеристик вакуумного фотоэлемента с однотипным фотокатодом.

## ДАННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

В настоящее время отечественная промышленность выпускает многокаскадные фотоумножители типов ФЭУ-17, ФЭУ-18 и ФЭУ-19. Мелкосерийно изготовляются многокаскадные фотоумножители ВЭИ. Многокаскадные фотоумножители получили широкое применение в научно-исследовательской практике. Наряду с многокаскадными фотоумножителями выпускаются два типа однокаскадных фотоумножителей, а именно ФЭУ-1 и ФЭУ-2.




Фиг. 18. Конструктивное оформление и размеры однокаскадных фотоумножителей.
*а* — ФЭУ-1; *б* — ФЭУ-2.

На фиг. 18 показано конструктивное оформление однокаскадных фотоумножителей. Фотоумножитель типа ФЭУ-1 выполнен подобно фотоэлементу СЦВ-4. Вывод его эмиттера сделан сбоку цоколя в виде зажима с изолированной головкой. Расположение выводов анода и катода то же, что и у СЦВ-4.

Фотоумножитель типа ФЭУ-2 по своему конструктивному оформлению напоминает фотоэлемент СЦВ-3. Со сто-

роны вывода анода расположен металлический цилиндрик, к которому присоединен вывод эмиттера.

Умножители ФЭУ-1 и ФЭУ-2 имеют сурьмяно-цезиевые фотокатод и эмиттер. Преимуществом этих фотоумножителей по сравнению с сурьмяно-цезиевыми вакуумными фотоэлементами является то, что при том же (даже несколько меньшем) питающем напряжении их интегральная чувствительность приблизительно в 4—5 раз больше, достигая 400, а в некоторых экземплярах даже 800 *мка/лм*. Темновой ток этих фотоумножителей, равный $1 \cdot 10^{-7}$ *a*, определяется в основном током утечки. Напряжение между катодом и эмиттером 170 *в*, между катодом и анодом 220 *в*.

## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Наиболее широкое применение многокаскадные фотоумножители находят в приборах, посредством которых осуществляется измерение или обнаружение весьма слабых световых потоков.

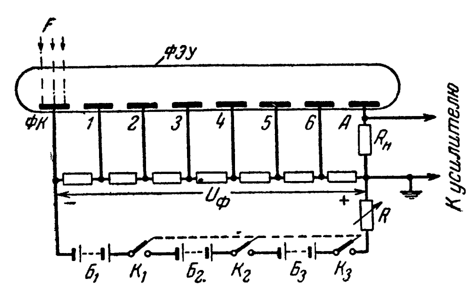
Простота, с которой достигаются значительное усиление фототока и почти полное исключение влияния помех, создаваемых внешними электрическими полями, с которыми приходится бороться при применении других фотоэлементов, основанных на внешнем фотоэффекте, приводит к тому, что область применения фотоумножителей непрерывно растет. В частности, фотоумножители начинают все шире применяться в автоматике и телемеханике.

Рассмотрим схемы питания фотоумножителей. Включение анодной цепи умножителя принципиально ничем не отличается от включения анодной цепи вакуумного фотоэлемента. Сравнительно большой выходной ток многокаскадного фотоумножителя, достигающий во многих случаях $10^{-4}$—$10^{-3}$ *a*, при решении ряда задач допускает непосредственное включение микроамперметра или гальванометра, как это было показано на фиг. 15. Во избежание повреждения измерительного прибора при внезапном появлении в фотоумножителе газа необходимо включать прибор последовательно с охранным сопротивлением порядка 1 *мгом*.

Коэффициент усиления фотоумножителя существенным образом зависит от постоянства питающего напряжения. Можно показать, что имеет место равенство $\frac{\Delta M}{M} = n \frac{\Delta U_ф}{U_ф}$. Из этого равенства следует, что изменению питающего напряжения $U_ф$ на $1\%$ соответствует измене-

ние коэффициента усиления $M$ на $n\%$, где $n$ — число каскадов фотоумножителя. Так как ошибка при измерениях обычно не должна превосходить 1%, то при $n=10$ необходимо постоянство напряжения $U_ф$ с точностью 0,1%, а в ряде случаев еще более высокое.

В качестве стабильного источника напряжения можно воспользоваться группой анодных батарей, соединенных последовательно и присоединенных к фотоумножителю так, как это показано на фиг. 15. Здесь каждая батарея обозначена символом одного элемента. Однако такое включение не всегда удобно. В некоторых случаях пользуются специально изготовленными малоемкостными секционированными высоковольтными батареями, так как обычно наибольшая величина тока не превышает 1 *мка*. Каскадное напряжение обычно имеет величину 50—100 *в*, и напряжение питания многокаскадного фотоумножителя достигает 750—1 250 *в*.




Фиг. 19. Схема питания фотоумножителя с плавной регулировкой напряжения.

Высоковольтная батарея на 750—1 250 *в* должна обладать очень хорошей изоляцией, иначе неизбежен значительный ток саморазряда. Чтобы уменьшить разряд подобной батареи, ее часто делят на несколько блоков (три-четыре), соединяемых последовательно перед началом работы.

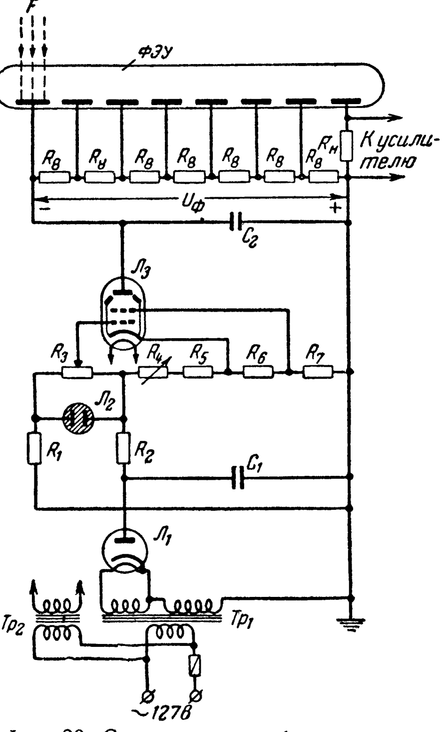
Чтобы обеспечить возможность управления в известных пределах коэффициентом усиления фотоумножителя, применяют схему, изображенную на фиг. 19. Регулировка напряжения фотоумножителя $U_ф$ осуществляется переменным сопротивлением $R$, которое обычно делают состоящим из двух секций — плавной и грубой регулировки.

Нагрузочное сопротивление $R_н$, включенное между анодом и зажимом $+U_ф$, который в большинстве случаев заземляется, подключается ко входу усилителя.

С целью уменьшения саморазряда высоковольтная батарея разделена на три секции: $Б_1$, $Б_2$ и $Б_3$. Последовательное соединение секций и подключение их к схеме осуществляются перед началом работы строенным выключателем $К_1$, $К_2$, $К_3$.

Все сопротивления делителя — высокоомные, обычно порядка $10^5$—$10^6$ *ом* — подбираются с точностью 1—2%. Чтобы исключить перераспределение напряжения при изменении величины фототока и тока эмиттеров, ток делителя должен быть по крайней мере в 10 раз больше наибольшего значения тока в цепи умножителя.

При питании от сети переменного тока, в тех случаях, когда требуется стабилизация напряжения, можно воспользоваться сравнительно простой схемой, показанной на фиг. 20.




Фиг. 20. Схема питания фотоумножителя от сети переменного тока с электронной стабилизацией напряжения.

Выпрямленное высокое напряжение подается на делитель напряжения фотоумножителя (группа сопротивлений $R_8$) через лампу $Л_3$, выполняющую функцию электронного регулятора напряжения. Посредством потенциометра $R_3$ на управляющую сетку лучевой лампы $Л_3$ подается положительное смещение. Это смещение изменяет сопротивление лампы $Л_3$ постоянному току. Перемещая движок потенциометра $R_3$, можно менять величину напряжения фотоумножителя $U_ф$. Регулировкой сопротивления $R_4$ осуществляется выбор режима, при котором имеет место стабилизация напряжения.

Для получения стабилизированного напряжения $U_ф$=1 000—1 200 *в* при выпрямленном напряжении, равном примерно 1 800 *в*, данные схемы стабилизации напряжения примерно таковы: $R_3$=1 *мгом* (потенциометр); $R_4$=10 *ком* (проволочное сопротивление); $R_5$ = 20 — 30 *ком*, 2 *вт*; $R_6$ = 80 — 100 *ком*, 4 *вт*; $R_1 = R_7$ = 1 *мгом*, 8 *вт*; $Л_2$ — СГ4С; $Л_3$ — 6П6С.

Сопротивления $R_3$ и $R_4$ должны быть хорошо изолированы от шасси, так как они находятся под высоким напряжением (— 1,8 *кв*!) по отношению к нему. Для получения выпрямленного напряжения порядка 1 800 *в* можно воспользоваться двумя трансформаторами типа ЭЛС-2, вторичные обмотки которых включены последовательно, а выпрямление осуществлено по схеме удвоения напряжения.

Если измеряемый ток на выходе умножителя мал, то обычно применяется последующее усиление тока. Для этой цели используются усилители фототока, описанные в гл. 3 и 7.

*Глава четвертая*

# ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

## ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Явление *внутреннего фотоэффекта*, называемое также явлением *фотопроводимости*, было открыто в 1873 г.

Сущность этого явления заключается в том, что при освещении некоторых полупроводников или диэлектриков электроны отдельных атомов кристаллической решетки вещества, приобретая достаточную по величине дополнительную энергию, отрываются от атомов и превращаются в электроны проводимости.

Так как проводимость полупроводников и диэлектриков обычно весьма мала, то появление в них электронов проводимости ведет к заметному повышению их проводимости, а следовательно, к уменьшению их сопротивления.

При приложенном к облученному веществу напряжении от внешнего источника возникает поток электронов проводимости, именуемый «первичным» фототоком проводимости.

Когда лучистый поток мал, «первичный» фототок проводимости практически безинерционен и изменяется прямо пропорционально величине лучистого потока, падающего на фотопроводящее вещество.

По мере возрастания величины лучистого потока увеличивается число электронов проводимости; двигаясь внутри вещества, электроны проводимости сталкиваются с атомами кристаллической решетки, ионизируют их, отрывая от последних слабо связанные электроны и создают дополнительный поток электронов проводимости. Увеличение числа ионизированных атомов тормозит движение электронов проводимости, и в веществе постепенно устанавливается равновесное состояние.

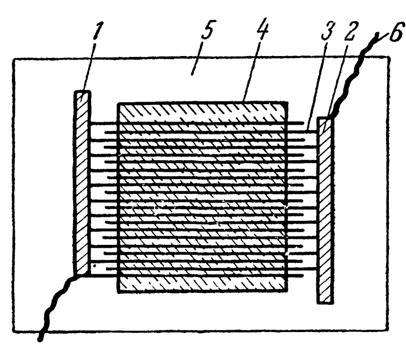
Дополнительный поток электронов проводимости, именуемый «вторичным» током проводимости, инерционен и не пропорционален лучистому потоку. По числу электронов «вторичный» ток значительно превышает «первичный».

Фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, называются *фотосопротивлениями* (или, кратко, ФС).

## ВИДЫ ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЙ

В настоящее время известно свыше десяти видов фотосопротивлений. К ним, в частности, относятся следующие: селеновые, таллофидные (или серно-таллиевые), серно-свинцовые, сернисто-висмутовые, теллур-свинцовые, а также из поликристаллического и монокристаллического сульфидов кадмия (последние именуются серно-кадмиевыми).

Наиболее часто фотосопротивления изготовляются следующим способом. На стеклянную пластинку, покрытую тонким слоем воска, посредством делительной машины наносится ряд параллельных друг другу штрихов. В результате протравливания плавиковой кислотой на местах штрихов образуются канавки которые после удаления воска заполняются золотом, аквадагом или другим химически неактивным проводящим материалом. Группы проводящих канавок соединяются так, как показано на фиг. 21, образуя систему электродов. Между электродами осаждается тонкий слой вещества фотосопротивления и проводится необходимая технологическая обработка этого слоя. Способы осаждения и технологическая обработка вещества сопротивления различны в зависимости от вида ФС. Для защиты от повреждений и воздействия влаги поверхность фотосопротивления покрывается слоем прозрачного лака. Затем оно монтируется в оправу с окном и двумя штырьками (вилкой), соединяемыми с его электродами.



Фиг. 21. Устройство фотосопротивления.

1 и 2 — основные электроды; 3 — штриховые электроды, нанесенные на подкладку; 4 — вещество фотосопротивления; 5 — подкладка; 6 — выводы.

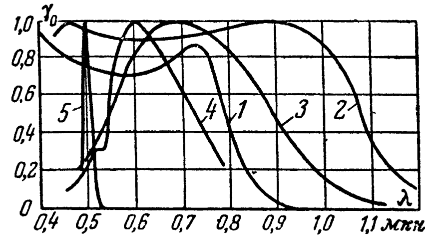
В некоторых типах фотосопротивлений вещество (например, сернистый висмут) наносится непосредственно на стеклянную пластинку, после чего через соответствующий шаблон осаждаются металлические гребенчатые электроды.

Монокристаллические серно-кадмиевые фотосопротивления выполняются из кристаллов размерами $10 \times 2 \times 0{,}12$ *мм*. Кристаллы приклеиваются посредством поли-

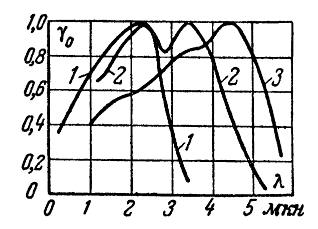
стиролового лака к слюдяной подкладке, после чего на их концы наносятся металлические электроды. Расстояние между электродами не превышает 1—2 *мм*.

## ВАЖНЕЙШИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЙ

Спектральные характеристики наиболее распространенных фотосопротивлений показаны на фиг. 22 и 23. Кривая *1* на фиг. 22 изображает спектральную характеристику селенового, а кривая *2* — таллофидного фотосопротивлений. Оба фотосопротивления имеют сравнительно широкие максимумы, лежащие соответственно в интервале 0,4 — 0,75 и 0,45 — 1,0 *мкн*. Серно-висмутовое фото-




Фиг. 22. Спектральные характеристики фотосопротивлений, чувствительных в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.




Фиг. 23. Спектральные характеристики фотосопротивлений, чувствительных в инфракрасной части спектра.

сопротивление (кривая *3*) имеет $\lambda_{макс}$ в области 0,68 *мкн* и $\lambda_{гр}$ — около 1,4 *мкн*. Спектральная характеристика этого фотосопротивления обладает большим постоянством; разброс чувствительности для различных экземпляров не превышает $\pm 10\%$. Фотосопротивления из поликристаллического сульфида кадмия (кривая *4*) имеют $\lambda_{макс}$ около 0,6 *мкн*. Следует отметить, что спектральную характеристику этого фотосопротивления можно изменить так, чтобы ее $\lambda_{макс}$ могли принимать значения, лежащие в интервале 0,5 — 0,6 *мкн*. Фотосопротивления из монокристаллического сульфида кадмия, называемые также сернокадмиевыми (кривая *5*), обладают высокоселективной спектральной характеристикой с $\lambda_{макс} = 0{,}505$ *мкн*. При $\lambda = 0{,}55$ *мкн* фоточувствительность падает почти до нуля.

На фиг. 23 показаны спектральные характеристики фотосопротивлений, максимум чувствительности которых лежит в инфракрасной части спектра. К этим фотосопротивлениям относятся, в частности, серно-свинцовые (кривая *1*) с $\lambda_{макс} = 2{,}2 - 2{,}3$ *мкн* при 20° С и $\lambda_{гр} = 3{,}5$ *мкн*, селенисто-свинцовые (кривая *2*) с двумя максимумами при $\lambda_{макс} = 2{,}3$ и 3,3 *мкн* и $\lambda_{гр} = 5{,}5$ *мкн*, теллур-свинцовые (кривая *3*) с $\lambda_{макс} = 4{,}4$ *мкн* и $\lambda_{гр} = 5{,}7$ *мкн*.

Спектральная характеристика серно-свинцовых ФС значительно изменяется с изменением температуры. Так, например, при температуре жидкого воздуха (—170° С) $\lambda_{макс} = 2{,}7$ *мкн* и $\lambda_{гр} = 3{,}9$ *мкн*.

Для возникновения фототока фотосопротивление, соединенное последовательно с сопротивлением нагрузки $R_н$, подключают к источнику с постоянной э. д. с. $E$. Если фотосопротивление находится в темноте, то через него течет *темновой ток* $i_т = \frac{E}{R_т + R_н}$. Здесь $R_т$ — величина сопротивления ФС в темноте, именуемая *темновым сопротивлением*. Когда фотосопротивление освещено, через него течет *световой ток* $i_с = \frac{E}{R_с + R_н}$. Так как проводимость фотосопротивления при облучении его потоком $F$ растет, то его сопротивление в освещенном состоянии $R_с$, именуемое *световым сопротивлением*, становится меньше темнового сопротивления.

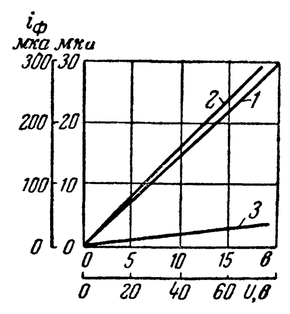
Световой ток $i_с = i_т + i_ф$, где $i_ф$ — фототок. У фотосопротивления фототок $i_ф$ является функцией светового потока $F$ и напряжения $U$, падающего на фотосопротивлении. Поэтому определение чувствительности в *мка/лм* или *а/вт* без указания, при каком напряжении и световом потоке (или освещенности) оно имеет место, является неполным, так как такое определение не позволяет оценить истинного значения чувствительности фотосопротивления.

Зависимость фототока и темнового тока от напряжения, падающего на фотосопротивлении, выражается вольтамперной характеристикой. Для фотосопротивлений эта зависимость имеет линейный характер. На фиг. 24 показаны вольтамперные характеристики некоторых ФС, снятые при освещенности 120 *лк*. Освещенности 120 *лк* соответствует энергия, приблизительно равная $500 \cdot 10^{-6}$ *вт/см*$^2$, излучае-

мая лампочкой с вольфрамовой нитью при цветовой температуре 2 840° K.

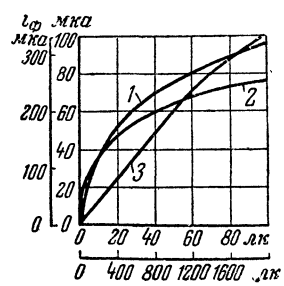
На фиг. 24 серно-свинцовым ФС соответствуют внутренний, а сернисто-висмутовым — внешний масштабы.

При значительном повышении напряжения $U$ имеет место нарушение закона Ома, а следовательно, линейности вольтамперной характеристики вследствие рассеяния на фотосопротивлении мощности, превышающей допустимую. Например, для монокристаллических серно-кадмиевых ФС линейность вольтамперной характеристики сохраняется до мощности, не превышающей 10 *мвт*. При мощности 100 *мвт* эти ФС обычно разрушаются.




Фиг. 24. Вольтамперные характеристики фотосопротивлений.

*1* — серно-свинцового и *2* — сернисто-висмутового (при освещенности 120 *лк*); *3* — сернисто-висмутового для темнового тока.




Фиг. 25. Световые характеристики фотосопротивлений.

Зависимость фототока от светового потока (или освещенности) имеет нелинейный характер и выражается зависимостью $i_ф = AF^x$, где $A$ — постоянная величина для данного фотосопротивления, а $x$ меньше или равно единице.

На фиг. 25 показаны световые характеристики сернисто-висмутового (кривые *1* и *2*) и серно-кадмиевого (кривая *3*) фотосопротивлений. Кривым *1* и *3* соответствует внутренний, а кривой *2* — внешний масштаб. Световые характеристики серно-свинцовых ФС при одинаковых значениях освещенности приблизительно аналогичны световым характеристикам сернисто-висмутовых ФС, однако их фототок в 50—100 раз меньше фототока последних.

Чтобы правильно оценить чувствительность фотосопротивления, определяют интегральную чувствительность, от-

несенную к единице приложенного напряжения, т. е. к 1 *в*. Выраженная таким образом чувствительность называется *удельной чувствительностью.*

Удельная чувствительность $K = \frac{i_ф}{UF}$ измеряется в $\frac{мка}{лм \cdot в}$ или $\frac{мка}{вт \cdot в}$. При этом обязательно указывают значение потока (или освещенности), при котором эта чувствительность имеет место, что необходимо ввиду нелинейной зависимости фототока от светового потока. Обычно для удобства сопоставления различных фотосопротивлений удельную чувствительность указывают при освещенности 1 или 100 *лк*.

В ряде случаев вместо удельной чувствительности важно знать относительное изменение величины сопротивления ФС, вызванное световым потоком (или освещенностью). В этом случае определяют величину $\frac{\Delta R}{R_m}$, где

$$\Delta R = R_m - R_c.$$

Величина $\Delta R$ зависит только от светового потока $F$ и не зависит от напряжения $U$. Зная величину $\frac{\Delta R}{R_m}$ (или ее значение в процентах), соответствующую потоку $F$, и величину темнового сопротивления $R_m$, можно определить световое сопротивление $R_c$. Установив величину $R_c$, можно, исходя из заданных значений сопротивления нагрузки $R_н$ и э. д. с. источника питания, легко определить величины $i_c$ и $i_ф$.

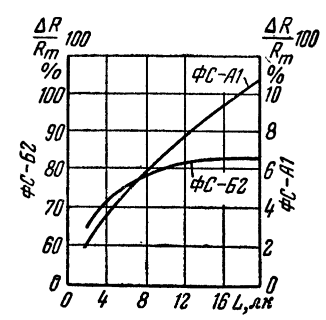
На фиг. 26 показаны процентные изменения $\frac{\Delta R}{R_m}$ в зависимости от величины освещенности для серно-свинцовых и сернисто-висмутовых фотосопротивлений.

Фотосопротивление можно также характеризовать величиной отношения $\frac{R_m}{R_c}$, указывая при этом значения напряжения $U$ и светового потока $F$. Значение $\frac{R_m}{R}$ тем выше, чем больше темновое сопротивление $R_m$.

Чувствительность фотосопротивления возрастает с повышением напряжения. Однако величина напряжения, падающего на фотосопротивлении, ограничивается его тепло-

вым режимом, определяемым рассеиваемой на нем мощностью, стабильностью работы и пропускной способностью контактов. Поэтому для каждого вида фотосопротивлений установлены его максимально допустимые значения напряжения.

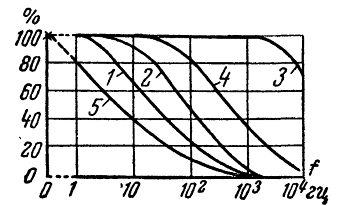
Так, например, для серно-свинцовых ФС, темновое сопротивление которых может принимать значения 30—300 *ком*, падение напряжения, приходящееся на каждый килоом, должно лежать в пределах 0,4—0,1 *в*. Для сернисто-серебряных ФС, имеющих величину сопротивления порядка 0,3 *мгом*, оно составляет 0,1 *в* на 1 *ком*, достигая для образцов с $R_m = 3$ *мгом* 0,03 *в* на 1 *ком*.




Фиг. 26. Процентное изменение $\frac{\Delta R}{R_m}$ в зависимости от величины освещенности.

ФС-А1 — для серно-свинцового ФС; ФС-Б2 — для сернисто-висмутового ФС.

Для поликристаллических сульфидно-кадмиевых ФС наибольшая величина напряжения определяется максимальной мощностью рассеяния на ФС, равной 0,3 *вт*.




Фиг. 27. Частотные характеристики фотосопротивлений.

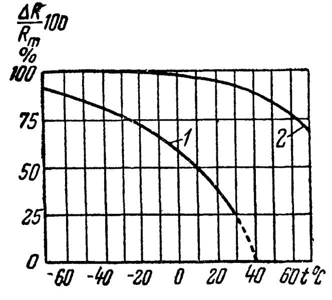
*1* — селенового; *2* — таллофидного; *3* — серно-свинцового; *4* — сернисто-висмутового; *5* — монокристаллического серно-кадмиевого.

Чувствительность ФС некоторых типов может быть значительно повышена сильным охлаждением либо путем фотоактивации ФС светом. Так, например, охлаждение серно-свинцовых ФС с 20 до —60° С повышает его чувствительность в 100 раз.

Фотоактивация сводится к освещению ФС светом надлежащего спектрального состава от дополнительного источника. Наиболее эффективна фотоактивация светом для монокристаллических серно-кадмиевых ФС. При освещении такого ФС модулированным световым потоком с длиной волны $\lambda = 0{,}505$ *мкн* и применении для фотоактивации синего немодулированного света ($\lambda = 0{,}45$—$0{,}48$ *мкн*) чувствительность возрастает в десятки раз. Однако при осве-

щении того же серно-кадмиевого ФС красным или инфракрасным светом чувствительность его резко падает.

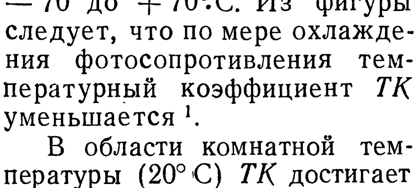
Зависимость чувствительности различных ФС от частоты модуляции светового потока представлена на фиг. 27. Как видно из фигуры, наибольшей инерционностью обладают серно-кадмиевые фотосопротивления (кривая *5*). Серно-свинцовые фотосопротивления (кривая *3*) наименее инерционны. При модуляции светового потока с частотой несколько тысяч герц серно-свинцовые фотосопротивления почти не вносят искажений в величину фототока.




Фиг. 28. Зависимость процентного изменения $\frac{\Delta R}{R}$ от температуры.

*1* — для серно-свинцового ФС;
*2* — для сернисто-висмутового ФС.

Свойства фотосопротивления, как и всякого полупроводника, зависят от температуры. На фиг. 28 показано процентное изменение величины $\frac{\Delta R}{R_m}$ с изменением температуры фотосопротивления от — 70 до + 70°С.



Из фигуры следует, что по мере охлаждения фотосопротивления температурный коэффициент *ТК* уменьшается [1].

В области комнатной температуры (20° С) *ТК* достигает 0,9% на 1° С для серно-свинцового и 0,24% на 1° С — для сернисто-висмутового фотосопротивления.

У ряда фотосопротивлений после их изготовления наблюдается изменение чувствительности и темнового сопротивления даже в том случае, когда фотосопротивление не применяется для работы. При этом, например, у серно-свинцового ФС происходит уменьшение темнового сопротивления и возрастание чувствительности, а у сернисто-висмутовых и серно-кадмиевых ФС — уменьшение чувствительности. Спустя 2 мес. после изготовления, этот процесс прекращается, после чего чувствительность и темновое сопротивление ФС становятся практически постоянными.

Преимуществами фотосопротивлений по сравнению с другими фотоэлектрическими приборами являются их

---

[1] Температурным коэффициентом называется изменение величины $\frac{\Delta R}{R_m}$ при изменении температуры на 1° С.

бо́льшая чувствительность в инфракрасной части спектра, что позволяет работать с низкотемпературными источниками излучения, бо́льшая интегральная чувствительность и весьма малые размеры. Недостатками фотосопротивлений являются значительная зависимость некоторых параметров от температуры, нелинейность световой характеристики, зависимость фототока от напряжения источника питания и значительная инерционность большинства фотосопротивлений.

## ТИПОВЫЕ ДАННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЙ

В настоящее время изготовляются серно-свинцовые (ФС-А1 и ФС-А4), сернисто-висмутовые (ФС-Б2), монокристаллические серно-кадмиевые (ФСК-М1) и поликристаллические серно-кадмиевые (ФС-К1 и ФС-К2) фотосопротивления. Общий вид этих фотосопротивлений показан на фиг. 29. Все фотосопротивления оформлены в виде штепсельных вилок специальных конструкций, рассчитанных на вставление их в симметрично распо́ложенные гнезда обычной восьмиштырьковой ламповой панельки.

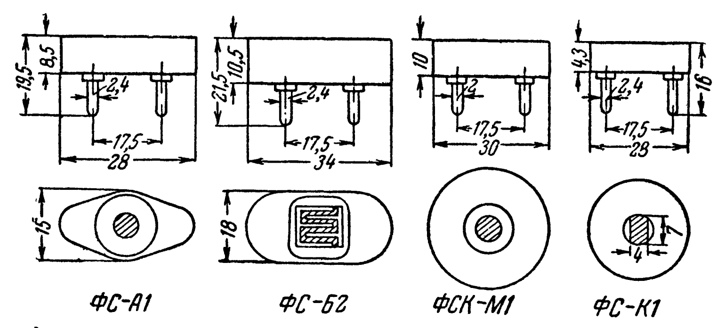
Важнейшие данные этих фотосопротивлений приведены в табл. 4.

*Таблица 4*

| Вид сопротивлений | Тип | Рабочая площадь, *мм*² | $\lambda_{макс}$, *мкн* | Темновое сопротивление, *ом* | Удельная чувствительность, *мка/лм·в* | Предельное рабочее напряжение, *в* | Средняя кратность изменения сопротивления | Средний температурный коэффициент фототока в интервале температур 0÷40° С, % на 1° С |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Серно-свинцовое | ФС-А1, ФС-А4 | 4×7 | 2,1 | $10^4$—$10^5$ | 500 | 15 | 1,2 | 1,5** |
| Сернисто-висмутовое | ФС-Б2 | 11×11 | 0,7 | $10^5$—$10^7$ | 1 000 | 50 | 4 | 1,0** |
| Поликристаллическое серно-кадмиевое | ФС-К1 | 3,5×7,2 | 0,6 | $10^7$ | 3 000 | 400 | 140 | 1,4** |
| | ФС-К2 | 3,5×7,2 | 0,52 | $10^6$ | 2 500 | 300 | 35 | 0,12** |
| Монокристаллическое серно-кадмиевое | ФСК-М1 | 28 | 0,505 | $10^{12}$ | Чувствительность 2 *а/лм* при 100 *лк* и 60 *в* * | | — | — |

* При $T_ц$ = 2 360° К. Для всех остальных ФС — при $T_ц$ = 2 840° К.

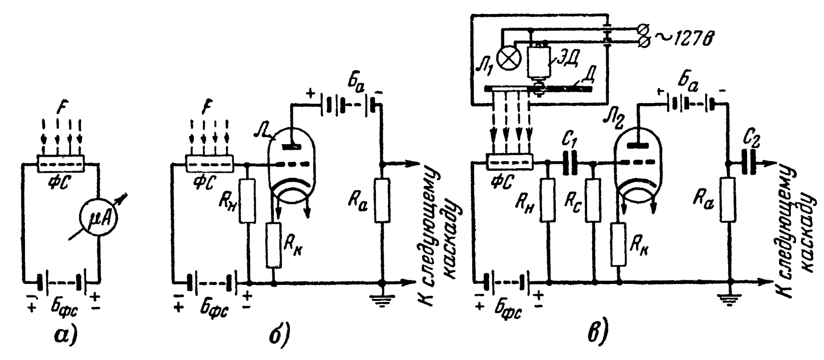
** По данным завода-изготовителя.




Фиг. 29. Общий вид и размеры фотосопротивлений ФС-А1, ФС-Б2, ФСК-М1 и ФС-К1.

## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЙ

Простейшие схемы включения фотосопротивлений показаны на фиг. 30. Схема *а* используется в тех случаях, когда облучающий поток сравнительно велик и измеряемый фототок может быть непосредственно зарегистрирован по гальванометру или микроамперметру.




Фиг. 30. Простейшие схемы включения фотосопротивлений.

Если облучающий поток мал, а также в тех случаях, когда получаемый фототок недостаточно велик, для приведения в действие миллиамперметра или иной, более грубой нагрузки (реле, электромагнита) прибегают к усилению фототока. Включение фотосопротивления принципиально ничем не отличается от включения фотоэлемента с внешним фотоэффектом. На схеме *б* показано включение фотосопротивления в цепь усилителя постоянного тока, а на схеме *в* — в цепь усилителя переменного тока. В последнем

случае необходима модуляция светового потока, облучающего фотосопротивление. Слева сверху на схеме *в* показан один из способов модуляции потока, излучаемого электрической лампой накаливания.

Заметим, что в случае фотосопротивлений возможна любая полярность включения батареи $Б_{фс}$. Выбор способа включения определяется экономическими соображениями. Обычно стремятся так включить фотосопротивление, чтобы отпала необходимость в отдельном источнике питания, заменяющем батарею $Б_{фс}$.

*Глава пятая*

# ВЕНТИЛЬНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

## ВЕНТИЛЬНЫЙ ФОТОЭФФЕКТ

В 1888 г. русский ученый В. А. Ульянин впервые наблюдал следующее явление: при освещении селенового стержня, к концам которого были присоединены металлические электроды, в его цепи возникал электрический ток без внешней э. д. с. Было установлено, что это явление возникает в электрической цепи, содержащей контактную пару металл—полупроводник, при падении света на границу раздела металла и полупроводника.

Указанное явление получило название *вентильного фотоэффекта*, а элементы, преобразующие подобным образом световую энергию в электрическую, — *вентильных фотоэлементов.*

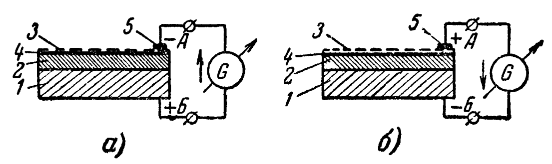
В настоящее время применяются вентильные элементы только сложного полупроводникового типа.

Ввиду того что полупроводниковые вентильные фотоэлементы имеют запорный слой, пропускающий ток в одном направлении, их называют также *фотоэлементами с запорным слоем*, а вентильный фотоэффект — *фотоэффектом в запорном слое.*

## ВИДЫ ВЕНТИЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

*Меднозакисные* (*купроксные*) *фотоэлементы* были разработаны в 1925 г. Устройство этих фотоэлементов изображено на фиг. 31,*а*. На медный электрод *1* наносится слой полупроводника (закиси меди) *2*, на который распылением в вакууме осаждается полупрозрачная пленка золота *3*. Эта пленка имеет контакт с металлическим кольцом *5* и служит вторым электродом фотоэлемента.

Под действием света, падающего со стороны полупрозрачной пленки на слой полупроводника, из последнего вырываются электроны, которые движутся к золотому электроду и заряжают его отрицательно. В результате термообработки, проводимой при изготовлении фотоэлемента, между полупрозрачной пленкой золота и полупроводником образуется запорный слой *4*, который оказывает большое сопротивление обратному переходу электронов с полупрозрачной пленки на полупроводник. Таким образом, под действием света на электродах фотоэлемента возникает э. д. с. и в его внешней цепи течет ток. Меднозакисные фотоэлементы в силу своей малой чувствительности в настоящее время почти не применяются.




**Фиг. 31. Устройство вентильных фотоэлементов.**
*а* — меднозакисного и селенового; *б* — серно-таллиевого.

Работа В. А. Ульянина, содержащая подробное описание технологии и свойств селеновых вентильных фотоэлементов, долгие годы была забыта. Лишь после того, как были созданы меднозакисные фотоэлементы, вновь заинтересовались *селеновыми фотоэлементами*. Устройство современного селенового фотоэлемента с запорным слоем аналогично показанному на фиг. 31,*а*. На стальной электрод *1* в расплавленном состоянии наносится слой селена *2*. После отжига селена при 210° С на его поверхность осаждается полупрозрачная пленка золота *3*. Запирающий слой *4* образуется между селеном и полупрозрачной пленкой золота. Принцип действия селенового фотоэлемента не отличается от рассмотренного выше принципа действия меднозакисного фотоэлемента.

В 1937 г. были созданы серно-таллиевые фотоэлементы. Устройство современного *серно-таллиевого фотоэлемента* изображено на фиг. 31,*б*. На шероховатую поверхность стального электрода *1* испарением в вакууме при 60° С наносится тщательно очищенный слой *2*, состоящий из сернистого таллия в смеси с металлическим таллием. Затем слой *2* подвергается окислению на воздухе при 120° С. На слой *2* катодным распылением осаждается полупрозрачная пленка золота *3*. Между слоем *2* и пленкой *3*

образуется запорный слой из смеси сернистого таллия с окислами таллия.

Для предохранения фотоэлемента от действия воздуха и влаги его наружная поверхность покрывается слоем стиролового лака, а сам фотоэлемент монтируется в стеклянном баллоне, откуда выкачан воздух и под давлением 400 *мм* рт. ст. введен водород.

Серно-таллиевые фотоэлементы обладают так называемым «положительным» фотоэффектом, т. е. электроны, покидая полупрозрачный электрод, оставляют его заряженным положительно. У селеновых фотоэлементов полупрозрачный электрод заряжен отрицательно, а следовательно, они обладают «отрицательным» фотоэффектом.

Незадолго до Отечественной войны были разработаны *сернисто-серебряные фотоэлементы* (ФЭСС). Как и серно-таллиевые, сернисто-серебряные фотоэлементы обладают «положительным» фотоэффектом. В последнее время в литературе упоминаются *германиевые* вентильные фотоэлементы.

Кроме рассмотренных выше фотоэлементов, были также разработаны серно-свинцовые (галенитовые), селено-кадмиевые и селено-сернистые вентильные фотоэлементы. Ввиду того что эти фотоэлементы нашли ограниченное применение, мы их не рассматриваем.

## ВАЖНЕЙШИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

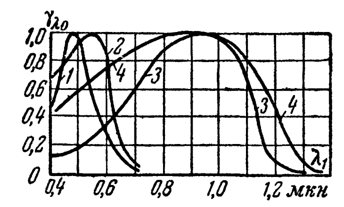
На фиг. 32 представлены спектральные характеристики медно-закисного *1*, селенового *2*, серно-таллиевого *3* и сернисто-серебряного *4* фотоэлементов. Спектральные характеристики меднозакисного и селенового фотоэлементов имеют приблизительно симметричный характер с максимумами, расположенными соответственно при 0,48 и 0,56 *мкн*. Кривая чувствительности этих фотоэлементов лежит в видимой части спектра, поэтому их интегральная чувствительность может быть выражена в *мка/лм*. Обычно интегральная чувствительность составляет 100—200 *мка/лм* для меднозакисных и 200—500 *мка/лм* для селеновых фотоэлементов.

Серно-таллиевые и сернисто-серебряные фотоэлементы чувствительны к инфракрасной области спектра; они обладают некоторой чувствительностью и в видимой части спектра. Максимумы их чувствительности лежат соответ-

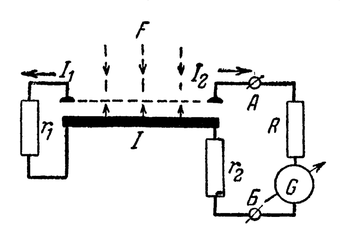
ственно при 0,95 и 0,85 *мкн*, а их красные границы чувствительности — при 1,3 и 1,4 *мкн*.

Чувствительность средних по качеству серно-таллиевых фотоэлементов составляет 4 000—6 000 *мка/лм*, достигая у лучших экземпляров 10 000 *мка/лм* ($T_ц = 2\,840°$ К); чувствительность средних по качеству ФЭСС лежит в пределах 3 500—4 500 *мка/лм*, достигая для лучших экземпляров 7 000—8 000 *мка/лм* ($T_ц = 2\,360°$ К). Чувствительность этих фотоэлементов правильнее было бы выражать в *мка/вт*. Например, у серно-таллиевого фотоэлемента, имеющего рабочую площадь 0,75 *см*², при освещенности 100 *лк* фототок равен $49 \cdot 10^{-6}$ *а*, что соответствуют интегральной чувствительности $\gamma = 138 \cdot 10^{-3}$ *а/вт*, или 6 500 *мка/лм*.

Спектральная характеристика германиевого фотоэлемента лежит в основном в инфракрасной части спектра, имея максимум при $\lambda_{макс} = 1{,}5$ *мкн* и крутой спад при




Фиг. 32. Спектральные характеристики вентильных фотоэлементов.




Фиг. 33. Эквивалентная схема вентильного фотоэлемента.

$\lambda = 1{,}9$ *мкн*. При $\lambda = 0{,}7$ *мкн* чувствительность достигает 50% максимального значения, продолжая падать в видимой части спектра. Интегральная чувствительность достигает 10 *ма/лм* при $T_ц = 2\,870°$ К.

Рассмотрение эквивалентной схемы вентильного фотоэлемента позволяет установить ряд важных свойств и зависимостей, характерных для фотоэлементов этого типа (фиг. 33).

Под действием светового потока $F$, падающего на фотоэлемент, возникает фототок $I$, пропорциональный световому потоку. Фототок $I = I_1 + I_2$, где $I_1$ — часть фототока, текущая по внутренней цепи через сопротивление $r_1$ запорного слоя, а $I_2$ — часть фототока, текущая через сопротивление полупроводника и полупрозрачной пленки $r_2$ и сопротивление $R_н$ внешней цепи (например, сопротивление измерительного прибора). Внутреннее сопротивление фотоэлемента $r = r_1 + r_2$ в основном определяется сопро-

тивлением запорного слоя $r_1$, величина которого убывает с ростом светового потока $F$.

Применяя законы Кирхгофа для схемы фиг. 33, определим $I_2 = I \frac{r_1}{r_1 + r_2 + R_н}$ и, учитывая, что $I = \gamma F$, получим:

$$I_2 = \gamma F \frac{r_1}{r_2 + r_1 + R_н}.$$

Для всякого вентильного фотоэлемента характерными являются фототок короткого замыкания $I_{к.з}$, который имеет место при коротком замыкании внешней цепи ($R_н \to 0$), и величина э. д. с. фотоэлемента $E_\infty$, определяемая как напряжение при $R_н \to \infty$. Очевидно, ток короткого замыкания $I_{к.з}$ равен току $I_2$ при $R_н = 0$. Таким образом,

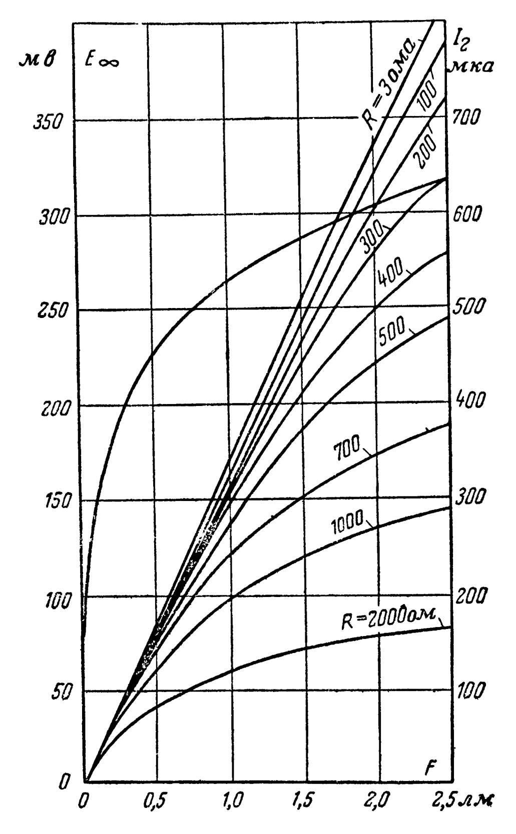
$$I_{к.з} = \gamma F \frac{r_1}{r_1 + r_2} = \frac{\gamma F}{1 + r_2/r_1}.$$

При малых значениях $F$ $r_1 \gg r_2$ и величиной $r_2/r_1$ можно пренебречь, откуда $I_{к.з} \approx \gamma F$. Следовательно, при сравнительно малых световых потоках и пользовании низкоомным гальванометром фототок $I_{к.з}$ будет приблизительно пропорционален измеряемому световому потоку. В тех случаях, когда сопротивление внешней цепи $R_н$ сравнительно велико, с возрастанием потока $F$ нарушается прямая пропорциональность между световым потоком $F$ и регистрируемым фототоком $I_2$.

Зависимость тока $I_2$ от светового потока $F$, представленная на фиг. 34, является световой характеристикой вентильного фотоэлемента. Как следует из фиг. 34, по мере возрастания сопротивления $R_н$ световая характеристика все больше отклоняется от прямой, являющейся световой характеристикой фотоэлемента при $R_н = 0$. Заметим, что при больших значениях светового потока $r_1$ становится соизмеримым с $r_2$ и отношением $r_2/r_1$ уже нельзя пренебречь. В этом случае $I_{к.з} = \frac{\gamma F}{1 + r_2/r_1}$ и световая характеристика по мере возрастания светового потока будет отклоняться от прямой.

Напряжение на зажимах $АБ$ фотоэлемента $U = I_2 R_н$. При $R_н \to \infty$ сопротивлением $r_2$ по сравнению с $R_н$ можно пренебречь. Нетрудно видеть, что в этом случае $I_2 R_н = E_\infty = r_1 \gamma F$.

Так как сопротивление $r_1$ резко уменьшается с возрастанием потока $F$, то характеристика $E_\infty = \varphi(F)$ имеет нелинейный характер. Эта характеристика хорошо выражается эмпирической формулой $E_\infty = b \lg F$, где $b$ — постоян-




Фиг. 34. Световые характеристики селенового фотоэлемента.

ная величина. Формула справедлива для вентильных фотоэлементов любых видов.

На фиг. 34 кривая $E_\infty$ выражает зависимость $E_\infty = \varphi(F)$. Все кривые фиг. 34 даны для селенового фотоэлемента. Световые характеристики вентильных фотоэлементов других видов аналогичны характеристикам, приведенным на фиг. 34.

Иногда световую характеристику изображают, откладывая по оси абсцисс освещенность $L$, создаваемую потоком $F$ на рабочей площади $S$ фотокатода.

Величины $a = \frac{\Delta I_2}{\Delta F}$ и $b = \frac{\Delta E_\infty}{\Delta F}$ могут быть получены для кривых $I_2 = \varphi(F)$ и $E_\infty = \varphi(F)$ проведением касательной к соответствующей кривой при заданном значении $F$ и носят название *токовой* и *вольтовой чувствительности* вентильного фотоэлемента.

В линейной части световой характеристики отношение $\frac{\Delta I_2}{\Delta F}$ постоянно. Для этого участка кривой $\frac{\Delta I_2}{\Delta F} = \frac{I_2}{F} = \gamma$. Вольтовая чувствительность, как следует из характера кривой $E_\infty = \varphi(F)$, резко уменьшается с возрастанием светового потока.

Обычно токовая чувствительность выражается в *мка/лм* или *мка/лк*, а вольтовая чувствительность — в *мв/лм* или *мв/лк*.

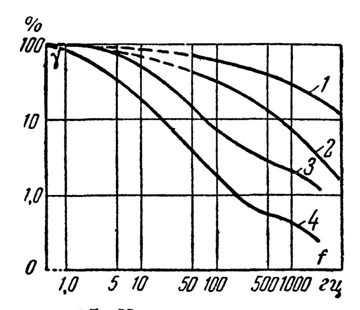
В вентильных фотоэлементах плоские электроды и тонкий слой полупроводника, расположенного между ними, образуют конденсатор, включенный параллельно сопротивлению $r_1$. Емкость этого конденсатора является одной из причин большой инерционности вентильных фотоэлементов. О степени их инерционности можно судить по частотным характеристикам, приведенным на фиг. 35.

На фиг. 35 представлены частотные характеристики сернисто-серебряных и селеновых фотоэлементов, снятые в синусоидально-модулированном свете при частотах модуляции 1—5 000 *гц*. Кривые *2* и *4* имеют более резкий спад с повышением частоты по сравнению с соответствующими кривыми *1* и *3*. Это объясняется тем, что емкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ шунтируется сопротивлением $r_2 + R_н$. При большом значении сопротивления $R_н$ шунтирующее действие $r_2 + R_н$ не сказывается, тогда как при малом значении $R_н$ шунтирующее действие сопротивления $r_2 + R_н$ ослабляет влияние емкостного сопротивления.

Частотные характеристики серно-таллиевых фотоэлементов гораздо более пологи, чем селеновых. Например, при сопротивлении нагрузки, равном 50 *ом*, и частоте 5 000 *гц* чувствительность понижается лишь на 30%. При сопротивлении нагрузки, равном 1 *мгом*, чувствительность падает на 60%.

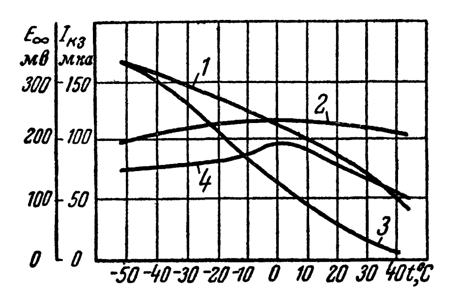
Свойства и параметры вентильных фотоэлементов сильно меняются с изменением температуры. На фиг. 36 показано, как с изменением температуры в пределах $-50 \div +50^\circ$ С меняются $E_\infty$ и $I_{к.з}$ серно-таллиевых и сернисто-серебряных фотоэлементов.

Экспериментально установлено, что причиной этих изменений $E_\infty$ и $I_{к.з}$ является зависимость сопротивлений $r_1$




**Фиг. 35.** Частотные характеристики вентильных фотоэлементов.

*1* — селенового при низкоомной нагрузке ($R = 50$ *ом*); *2* — селенового при высокоомной нагрузке ($R = 10\,000$ *ом*); *3* — сернисто-серебряного при низкоомной нагрузке ($R = 250$ *ом*); *4* — сернисто-серебряного при высокоомной нагрузке ($R \to \infty$).




**Фиг. 36.** Кривые изменения э. д. с. $E_\infty$ и тока $I_{к.з}$ в зависимости от температуры.

*1* — для э. д. с. $E_\infty$ сернисто-серебряных фотоэлементов; *2* — для тока $I_{к.з}$ сернисто-серебряных фотоэлементов ($R = 10$ *ом*); *3* — для э. д. с. серно-таллиевых фотоэлементов; *4* — для тока $I_{к.з}$ серно-таллиевых фотоэлементов.

и $r_2$ от температуры. Рациональным изменением технологии селеновых фотоэлементов можно сделать их чувствительность практически независимой от температуры. Все вентильные фотоэлементы обладают хорошим постоянством фототока при освещенностях, не превышающих 100 *лк*. При бóльших освещенностях (несколько тысяч люксов) наблюдаются утомление фотоэлемента и падение его чувствительности.

## ТИПОВЫЕ ДАННЫЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время изготовляются селеновые и сернисто-серебряные фотоэлементы, общий вид которых показан на фиг. 37. Фотоэлемент заключен в круглую оправу из эбонита или пластмассы. Его полупрозрачный электрод покрыт пленкой прозрачного лака. С боковой стороны выведены два зажима для подключения фотоэлемента к схеме.

*Таблица 5*

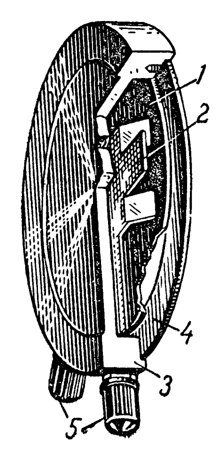
| Вид фотоэлемента | Тип | Интегральная чувствительность, *мка/лм* | Рабочая площадь, $см^2$ | $\lambda_{макс}$, *мкн* | Внутреннее сопротивление *r*, *ом* | Температурный коэффициент, % на 1° С | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $I_{к.з}$ | $E_{\infty}$ |
| Селеновый | К-5 | 250—500 | 5 | 0,55 | $10^3—5\cdot10^4$ | — | — |
| | К-10 | | 10 | | | | |
| То же | К-20 | | 20 | | | | |
| Сернороталлиевый | | Средние экземпляры 5 000 — 6 000; лучшие экземпляры 10 000 | 2 | 0,95 | | — | — |
| Сернисто-серебряный | ФЭСС-У-2 * | Средние экземпляры 3 500 — 4 500; лучшие экземпляры 7 000— 8 000 | 2 | 0,85 | 1 500—3 000 | 0,1—1 | 0,5—3 |
| | ФЭСС-У-3 | | 3 | 0,85 | 1 000—2 000 | | |
| | ФЭСС-У-5 | | 5 | 0,85 | 700—1 400 | | |
| | ФЭСС-У-10 | | 10 | 0,85 | 400—800 | | |

* ФЭСС-У означает ФЭСС усовершенствованный.

Важнейшие данные вентильных фотоэлементов приведены в табл. 5.

## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Основная область применения вентильных фотоэлементов — измерительная техника. Большим преимуществом вентильных фотоэлементов является то, что они не нуждаются в источниках питания. Недостатками вентильных фотоэлементов являются: низкая чувствительность по




Фиг. 37. Общий вид вентильного фотоэлемента.

напряжению, значительная зависимость их параметров от температуры, значительная инерционность, линейность световой характеристики $I_2 = \varphi(F)$ лишь при слабых световых потоках и необходимость включения фотоэлемента на низкоомную нагрузку. В связи с этим включение вентильного фотоэлемента на вход обычного реостатного усилителя низкой частоты невозможно и для измерительных целей часто используется простейшая схема включения, изображенная на фиг. 31.

В качестве измерительного прибора применяется гальванометр (стрелочный или зеркальный) или микроамперметр в зависимости от величин измеряемых потоков. Сопротивление измерительного прибора определяется величиной наибольшего светового потока, подлежащего измерению.

Допустим, что при пользовании селеновым фотоэлементом, обладающим чувствительностью $\gamma = 500$ *мка/лм*, наибольший по величине измеряемый поток $F = 0{,}5$ *лм*. В этом случае фототок $I_ф = \gamma F = 500 \cdot 0{,}5 = 250$ *мка*. Чтобы зарегистрировать этот ток, следует воспользоваться микроамперметром со шкалой 250 *мка*. Для сохранения линейной зависимости фототока $I_ф$ от светового потока $F$ вплоть до значения $F = 0{,}5$ *лм*, согласно фиг. 34 необходимо, чтобы сопротивление микроамперметра $R$ не превышало 500 *ом*.

Если световой поток равномерно распределен по сравнительно большой поверхности, то с целью повышения фото-э. д. с. и для возможности включения более высокоомных приборов можно собрать фотобатарейку из группы последовательно соединенных вентильных фотоэлементов, обладающих малой рабочей площадью.

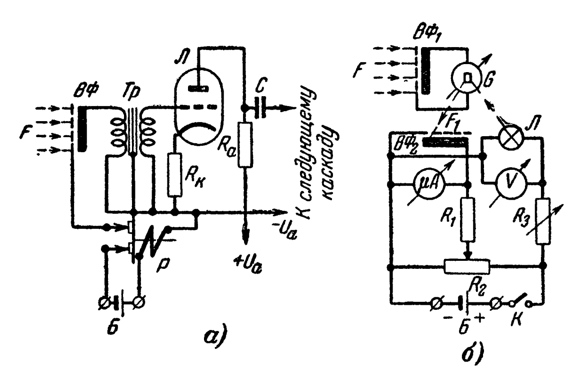
Были изготовлены батарейки из 25 селеновых фотоэлементов.

На стеклянную пластинку размерами $50 \times 50$ *мм* через шаблон (маску) распылением в вакууме наносились металлические электроды, на которые затем производилась возгонка селена. После термообработки наносились верхние полупрозрачные электроды. Последовательное соединение фотоэлементов батарейки производилось осаждением какого-либо металла через соответствующий шаблон. При освещенности 10 *лк* эта фотобатарейка имеет чувствительность 100 *мв/лк* вместо 6 *мв/лк* для обычного селенового фотоэлемента. Применение батарейки, составленной из большого числа малогабаритных вентильных фотоэлементов, позволяет осуществить усиление их напряжения, а также существенно улучшить частотную характеристику вследствие резкого уменьшения общей емкости.

На фиг. 38 показаны два способа усиления фототока вентильного фотоэлемента. В варианте *а* нагрузкой фото-

элемента является сравнительно низкоомная первичная обмотка трансформатора, включенная через контакты прерывателя. Возникший под действием постоянного потока, облучающего фотоэлемент, фототок периодически с некоторой частотой $f$ прерывается, в результате чего получаются импульсы тока, преобразуемые трансформатором в импульсы напряжения, которые затем усиливаются обычным усилителем низкой частоты.

В варианте *б* слабый световой поток $F$, падающий на вентильный фотоэлемент $ВФ_1$, регистрируется зеркальным гальванометром $G$, зеркальце которого освещается электри-




Фиг. 38. Схемы усиления фототока вентильного фотоэлемента.

ческой лампой *Л*, питающейся от батареи *Б*. Световой поток $F_1$, отраженный от зеркальца гальванометра $G$, падает на часть светочувствительной поверхности вентильного фотоэлемента $ВФ_2$.

С ростом величины измеряемого потока $F$ увеличивается угол, на который отклоняется зеркальце гальванометра, и возрастает величина освещаемой поверхности фотоэлемента $ВФ_2$, что ведет к увеличению фототока, регистрируемого микроамперметром.

Если бы фототок фотоэлемента $ВФ_2$ регистрировался по простой схеме (см. фиг. 31), то в данном случае наименьшей величине регистрируемого потока соответствовала бы некоторая значительная величина тока в цепи микроамперметра, его показания начинались бы не с нуля, а его шкала была бы неэффективно использована. В рассматриваемой схеме *б* применена компенсация фототока фотоэлемента $ВФ_2$ током противоположного направления, созда-

ваемым батареей *Б*, от которой одновременно питается и электрическая лампочка *Л*. Напряжение накала лампочки *Л* контролируется вольтметром *В* и регулируется реостатом $R_3$. Компенсация фототока постоянным током регулируется движком потенциометра $R_2$ в начале измерений, когда фотоэлемент $BФ_1$ затемнен ($F = 0$).

*Глава шестая*

# ВКЛЮЧЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

## ФОТОРЕЛЕ, СВЕТОВОЙ БАРЬЕР И СЛУЧАИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОРЕЛЕ

Применяемая во многих задачах фотоэлектронной автоматики аппаратура, состоящая из фотоэлемента, усилителя, электромагнитного реле, а также питающего устройства, именуется кратко *фотореле*. Обычно усилительная схема, применяемая в фотореле, представляет собой одно- или многокаскадный усилитель, заканчивающийся усилителем мощности (или тиратроном), мощность которого достаточна для приведения в действие исполнительного устройства либо промежуточного реле. В более простых установках вся усилительная схема состоит из одной электронной лампы или одного тиратрона. В этом случае величина светового потока, его спектральный состав, интегральная чувствительность фотоэлемента и величина сопротивления нагрузки подбираются так, чтобы управляющее напряжение, подаваемое на сетку усилителя мощности (тиратрона), было достаточным для нормальной работы последнего.

Наибольшее практическое применение имеют фотореле, действующие по принципу *светового барьера* (*преграды*). Сущность светового барьера заключается в следующем. Видимый или невидимый (например, инфракрасный) луч света направляется соответствующим источником через окно фотоэлемента на его фотокатод. Луч света образует световой барьер. Если световой барьер пересекается каким-либо телом, не пропускающим свет, то фототок в цепи фотоэлемента прекращается, меняется величина напряжения, подаваемого на вход усилителя, а следовательно, изменяется ток, текущий через электромагнит (реле), и последний срабатывает.

Фотореле, действующие на принципе светового барьера, применяются: в технике пожарной безопасности; для предохранения от травматизма при работе на штампах, прессах, автоматических молотах и других машинах, небезопасных в смысле травматизма; для невидимой охра-

ны сейфов, несгораемых шкафов, помещений, участков территории от воров и злоумышленников; для простого счета массовой продукции, движущейся на конвейере, и счета продукции с последующим сбрасыванием с конвейера бракованной продукции, автоматически контролируемой по важнейшим качественным показателям; при контроле уровня различных жидких или сыпучих тел, заполняющих баки, цистерны, элеваторы, с автоматическим прекращением подачи вещества при заполнении им контролируемого уровня; при контроле обрыва нити в текстильном производстве; при контроле качества бумаги, идущей для печати, в полиграфическом производстве; при контроле чистоты посуды в химическом и фармакологическом производствах; при контроле качества белизны и блескости продукции; в разнообразных простых задачах автоматического регулирования, как, например, доводке изготовляемого изделия до контрольного диаметра, при обточке на токарных станках и шлифовке на шлифовальных станках; при поддержании заданных значений температуры термостатов, инкубаторов и т. д.

Заметим попутно, что одно исчерпывающее перечисление задач, в которых могут найти применение фотореле, действующие на принципе светового барьера, не уместилось бы в объеме данной книги. Поэтому ниже мы ограничимся лишь несколькими характерными примерами их применения.

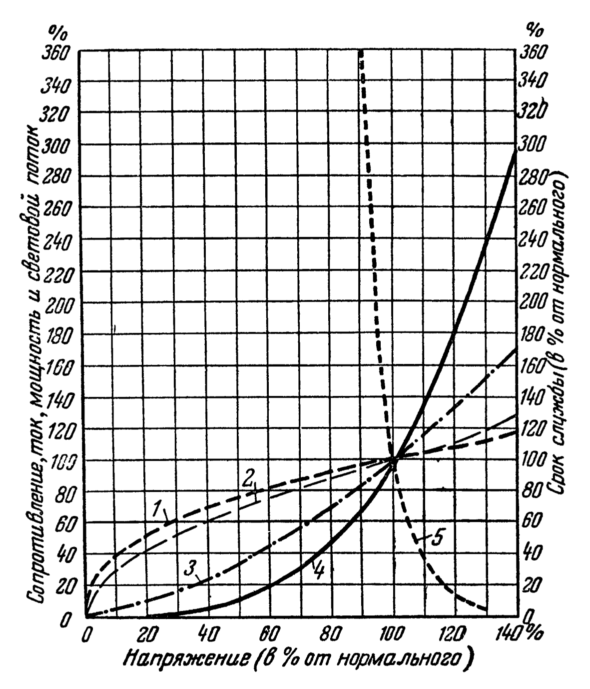
## ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ О ВЫБОРЕ СХЕМ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОТОРЕЛЕ

Световой поток, излучаемый источником света на фотоэлемент, должен обеспечить получение фототока такой величины, которая позволит осуществить вполне надежную работу фотореле; при этом фотоэлемент должен работать в условиях, не превышающих нормально допустимые. Вместе с тем сам источник света, обычно представляющий собой лампу с вольфрамовой нитью накаливания, должен работать в условиях, обеспечивающих длительное, безотказное действие фотореле.

Схема фотореле должна быть максимально проста и надежна. Необходимо стремиться к тому, чтобы в ней отсутствовали быстро портящиеся и перегорающие элементы. Если перегорающие элементы невозможно исключить из схемы, то должен быть обеспечен режим работы, позволяющий значительно удлинить срок службы перегорающих элементов. Это замечание в первую очередь относится к электрическим лампам накаливания, электронным и газонаполненным лампам, используемым в фотореле. С целью обеспечения большей длительности безотказного действия фотореле лампы накаливания включаются на пониженное напряжение.

Как следует из фиг. 39, понижение напряжения относительно нормального значения ведет к резкому возрастанию продолжительности горения лампы накаливания. Со-

гласно закону Вина с понижением температуры излучения уменьшается максимум излучения, который смещается в сторону бо́льших длин волн, а следовательно, меняется спектральная характеристика источника света. Полная мощность излучения, как следует из закона Стефана-




Фиг. 39. Кривые зависимости параметров электрической лампы накаливания с вольфрамовой нитью и ее срока службы от величины напряжения накала.
1 — сопротивление; 2 — сила тока; 3 — мощность; 4 — световой поток; 5 — срок службы.

Больцмана, падает с понижением температуры, а следовательно, имеет место уменьшение светового потока, излучаемого лампой.

В качестве примера укажем, что понижение напряжения на 10% по сравнению с нормальным ведет к увеличению долговечности приблизительно в 4 раза.

Питание фотореле обычно осуществляется от сети переменного тока. Необходимо предусмотреть, чтобы при изменении напряжения в допустимых пределах фотореле работало вполне надежно. В некоторых случаях при вы-

ключениях сети фотореле должно автоматически подключаться к аварийной (запасной) сети. Последние меры существенны лишь в тех случаях, когда фотореле должно сигнализировать аварию, пожар и т. п.

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Во многих задачах автоматики необходимо осуществить управление механической системой посредством электрической системы. Для этой цели служат электромагниты и электродвигатели всевозможных конструкций и мощностей. По способу управления электромеханические элементы разделяются на элементы прерывистого, скачкообразного и элементы плавного управления. К первым относятся электромагнитные реле, контакторы, электромагнитные муфты сцепления, ко вторым — всевозможные электродвигатели, плавное управление которыми осуществляется путем плавного изменения токов (напряжений), питающих их обмотки.

Рассмотрение электромеханических элементов автоматических устройств выходит за рамки данной книги. Интересующиеся могут ознакомиться с ними по книгам, указанным в литературе. Здесь же мы ограничимся рассмотрением двух типов электромагнитных реле постоянного тока.

Всякое электромагнитное реле имеет одну или несколько обмоток, по которым протекает управляющий ток, приводящий реле в действие. Обмотка реле надета на стальной сердечник (сплошной или листовой).

Рассматриваемые ниже электромагнитные реле имеют замкнутую магнитную цепь, состоящую из сердечника, якоря и воздушного зазора.

Якорь является подвижным элементом этой цепи. При протекании через обмотку достаточного по величине тока реле срабатывает, т. е. якорь притягивается к сердечнику, в результате чего величина воздушного зазора становится минимальной. С якорем механически связана контактная система реле. В результате перемещения якоря происходит перемещение подвижных пластин контактной системы и в зависимости от ее конструкции получается замыкание, размыкание либо переключение контактов. Некоторые реле содержат много контактов, позволяющих одновременно либо последовательно производить замыкание, размыкание и переключение ряда электрических цепей. С целью уменьшения износа контактов они выполняются из неокисляю-

щихся материалов, хорошо выдерживающих температуры, возникающие при образовании электрической искры. Обычно контакты реле выполняются из серебра платины или вольфрама. Для искрогашения параллельно замыкающейся или размыкающейся паре контактов включается искрогаситель, представляющий собой последовательно соединенные конденсатор емкостью 0,5 *мкф* и проволочное сопротивление 5 *ом*.

Контакты реле называются *фронтовыми*, если они замыкаются при притяжении якоря, и *тыловыми* — если они замыкаются при отпадании якоря.

Всякое электромагнитное реле характеризуется следующими параметрами: сопротивлением обмотки, диаметром провода, числом витков, рабочим напряжением (напряжение притяжения якоря), потребляемой мощностью (мощность, потребляемая обмоткой реле), мощностью, разрываемой контактами (максимально допустимой), временем притяжения (прямое замедление) и временем отпадания (обратное замедление) якоря, габаритом, весом, номером контактной группы, характеризующим назначение контактов реле (работа на замыкание, размыкание, переключение либо смешанные условия).

В связи с продолжительностью времени притяжения и отпадания якоря созданы как быстро-, так и медленно действующие реле.

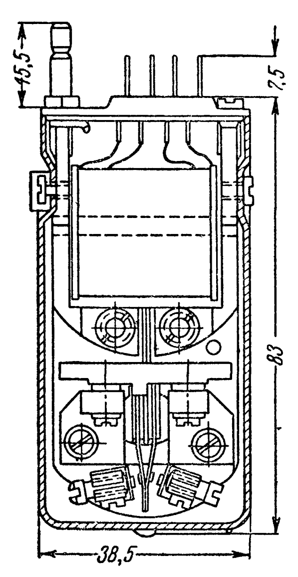
Обычно всякое реле рассчитано на несколько миллионов срабатываний при температуре окружающего воздуха $+10 \div +30°$ C и относительной влажности 50—70%. В том случае, если реле работает в более широких диапазонах температуры и влажности это указывается в его паспорте.

Кроме рассмотренных выше параметров реле, иногда указывают следующие: ток срабатывания (пусковой), ток намагничивания (рабочий ток, длительное время протекающий через обмотку реле), напряжение отпадания, ампервитки притяжения (произведение тока притяжения на число витков обмотки), ампервитки отпадания (произведение тока отпадания на число витков обмотки), тяговое усилие.

В фотоэлектронной автоматике применяются электромагнитные реле, имеющие нейтральные и поляризованные магнитные системы. Соответственно этому одни реле называются *нейтральными*, другие — *поляризованными*.

Ниже приводятся данные двух типов стандартных реле: нейтрального и поляризованного.

Реле типа КДРТ, применяемое в технике железнодорожной сигнализации и связи, называется *быстродействующим кодовым* (*трансмиттерным*) *реле*. Оно имеет неразветвленную магнитную цепь и усиленные контакты из вольфрама или другого металла. Реле выполняется только с одной контактной группой на переключение и, следовательно, позволяет осуществить одно замыкание или размыкание цепи. Реле может работать при изменении окружающей температуры в пределах —40° ÷ +60° С.




Фиг. 40. Общий вид электромагнитного реле РП-4.

Разрывная мощность контактов реле КДРТ достигает 1 000 *вт* переменного тока при потребляемой мощности порядка 1—3 *вт*, меняющейся в зависимости от режима его работы. Прямое замедление его якоря составляет 15—75 *мсек*, а обратное — 110—30 *мсек*. Его размеры 140×54×65 *мм* при весе 950 *г*. Данные обмотки и рабочего тока при различных значениях напряжения приведены в табл. 6.

Поляризованное реле типа РП-4 применяется в устройствах сигнализации и связи. Поляризованные реле имеют два магнитных потока: рабочий поток, создаваемый обмоткой (или двумя обмотками), по которой протекает ток, и поляризующий поток, создаваемый постоянными магнитами (фиг. 40).

Реле РП-4 является двухпозиционным реле. Это значит, что его якорь может занимать два положения (позиции). При прохождении через обмотку тока одного направления якорь отклоняется в одну сторону. При изменении направления тока или по прекращении тока в обмотке в зависимости от регулировки контактных винтов якорь переходит в другое положение. Одновременно с переменой положения якоря происходит переключение связанного с ним подвижного контакта, а следовательно, замыкание и размыкание контактов реле.

Реле РП-4 характеризуется следующими данными: ампервитки срабатывания равны 1,5 *ав*, допустимая (рабочая) мощность 1,0 *вт*, контакты выполнены из серебра

*Таблица 6*

| Обмотка | | | | Ток обмотки, *ма*, при напряжениях, *в* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Сопротивление, *ом* | Диаметр провода, *мм* | Число витков | Нормальное рабочее напряжение, *в* | 6 | 12 | 24 | 48 | 110 | 220 |
| 31 | 0,35 | 2 600 | 6 | 193 | 386 | 772 | — | — | — |
| 48 | 0,31 | 3 200 | 6; 12 | 125 | 250 | 500 | 1 000 | — | — |
| 72 | 0,29 | 4 000 | 12 | — | 167 | 333 | 666 | — | — |
| 120 | 0,25 | 5 150 | 12 | — | 100 | 200 | 400 | — | — |
| 280 | 0,20 | 7 500 | 12; 24 | — | 43 | 86 | 171 | 393 | — |
| 435 | 0,18 | 9 500 | 24 | — | — | 55 | 110 | 253 | — |
| 650 | 0,16 | 11 400 | 24 | — | — | 37 | 74 | 170 | — |
| 2 000 | 0,12 | 20 000 | 48 | — | — | — | 24 | 55 | 110 |
| 4 000 | 0,10 | 26 000 | 48; 110 | — | — | — | 12 | 27,5 | 55 |
| 9 000 | 0,08 | 40 000 | 110 | — | — | — | — | 12,2 | 24,5 |
| 17 000 | 0,07 | 57 000 | 220 | — | — | — | — | — | 12,9 |

*Таблица 7*

| Номер по каталогу | Обмотка | | | | | | | Ток срабатывания, *ма* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | № обмотки | Сопротивление, *ом* | Число витков | Марка провода | Диаметр провода, *мм* | Начало | Конец | |
| У.172.20.27/Э | I | 140 | 1 250 | ПЭЛ-1 | 0,09 | 1 | 2 | $I_{I+II}$ = 0,4—1,6 |
| | II | 140 | 1 250 | ПЭЛШО | 0,09 | 3 | 4 | — |
| | III | 140 | 1 250 | ПЭЛ-1 | 0,09 | 6 | 5 | — |
| | IV | 140 | 1 250 | ПЭЛШО | 0,09 | 8 | 7 | — |
| | V | 28 | 300 | ПЭЛШО | 0,12 | 9 | 10 | $I_V$ = 3,3—13,3 |
| | VI | 28 | 300 | ПЭЛШО | 0,12 | 11 | 12 | — |
| | VII | 2 250 | 5 000 | ПЭЛ-1 | 0,06 | 12 | 13 | $I_{VII}$ = 0,2—0,8 |
| У.172.20.28/Э | I | 8 500 | 22 000 | ПЭЛ-1 | 0,05 | 1 | 2 | $I_I$ = 0,045—0,10 |
| | II | 8 500 | 22 000 | ПЭЛ-1 | 0,05 | 3 | 4 | $I_{II}$ = 0,045—0,18 |
| У.172.20.29/Э | I | 4,5 | 500 | ПЭЛ-1 | 0,27 | 1 | 2 | $I_I$ = 0,18—0,73 |
| | II | 300 | 5 000 | ПЭЛ-1 | 0,14 | 3 | 4 | — |
| У.172.20.30/Э | I | 290 | 2 500 | ПЭЛШО | 0,09 | 1 | 2 | $I_I$ = 0,4—1,6 |
| | II | 290 | 2 500 | ПЭЛШО | 0,09 | 3 | 4 | $I_{I+II}$ = 0,2—0,8 |
| У.172.20.31/Э | I | 6 000 | 17 000 | ПЭЛ-1 | 0,05 | 1 | 2 | $I_I$ = 0,058—0,24 |
| | II | 6 000 | 17 000 | ПЭЛ-1 | 0,05 | 3 | 4 | $I_{II}$ = 0,058—0,24 |

и длительно работают при постоянном напряжении 24 *в* и токе 0,2 *а*. Максимально допустимый ток через контакты 5 *а*. Зазор между контактами и якорем 0,05 *мм*; индуктивности обмотки реле

$$L = (20 \div 30) \cdot 10^{-8} w^2 = L_0 w^2 \ гн.$$

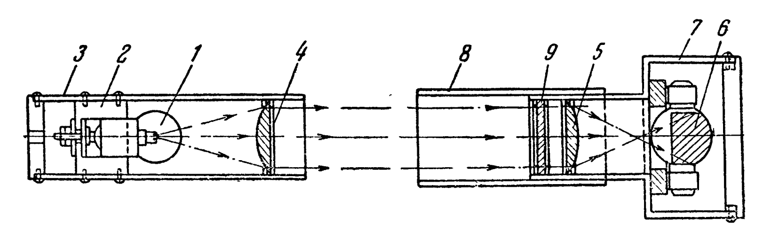
При $Iw = 20$ *ав* принимают $L \approx 20 \cdot 10^{-3}$ *гн*. Максимальная частота включений достигает 200 включений за 1 сек. Реле РП-4 имеет размеры 47,5×40×98,5 *мм* при весе, не превышающем 270 *г*.

В табл. 7 приведены данные обмоток реле РП-4.

Преимуществами поляризованных реле РП-4 являются высокая чувствительность (определяемая малой величиной ампервитков срабатывания) и малое время срабатывания.

## ОСВЕТИТЕЛЬ, ФОТОЭЛЕМЕНТ И ЕГО АРМАТУРА

Осветителем называется источник света, заключенный в арматуру, позволяющую направить узкий пучок света на катод фотоэлемента. На фиг. 41 показан общий вид осветителя и камеры с фотоэлементом. Источником света *1* является маломощная лампа накаливания, установленная в



Фиг. 41. Общий вид осветителя и камеры с фотоэлементом.

патроне *2*. Патрон вмонтирован в конце металлической светонепроницаемой трубы *3*. На другом конце трубы *3* располагается собирающая линза *4* (или объектив), посредством которой световой поток собирается в узкий пучок и направляется через линзу *5* на фотоэлемент *6*. Фотоэлемент заключен в камеру *7*. Линза *5* располагается таким образом, чтобы луч света, падающий на нее, освещал всю светочувствительную поверхность фотокатода.

С целью уменьшить влияние постороннего света, попадающего на фотокатод через линзу *5*, осуществляется ряд

мер, например на камеру с фотоэлементом надевается черненая внутри (матовое чернение) труба *8*.

Другой путь заключается в том, что работа фотореле осуществляется в таком участке спектра, в котором мешающее влияние постороннего источника света мало́, но при этом полностью сохраняется надежность действия фотореле. Например, пользуясь в качестве источника света лампой накаливания, обладающей спектральной характеристикой, представленной кривой *2* фиг. 2, и стремясь уменьшить мешающее действие солнечного света, можно работать, допустим, при $\lambda = 1{,}5$ *мкн*. В этом случае следует воспользоваться фотоэлементом, обладающим хорошей чувствительностью в области 1,5 *мкн*. Располагая перед фотоэлементом инфракрасный светофильтр, пропускающий инфракрасное изучение, начиная с 1,5 *мкн* и длиннее, можно существенно уменьшить мешающее действие солнечного света.

Когда рассмотренными выше мерами нельзя воспользоваться или если они недостаточно эффективны, прибегают к модуляции светового потока, излучаемого осветителем. Для этого перед линзой *4* осветителя помещают диск с прорезями, вращаемый электродвигателем с некоторой постоянной скоростью. При этом световой поток, падающий на фотокатод, прерывается с постоянной частотой $f = nk$ перерывов в секунду, где $n$ — число оборотов диска в секунду, а $k$ — число прорезей диска.

На фотокатод в этом случае падают два световых потока: постоянный поток мешающего источника света и модулированный поток от рабочего источника света. Усиливая фототок резонансным узкополосным усилителем переменного тока, настроенным на частоту $f$, можно существенным образом уменьшить влияние мешающего источника света.

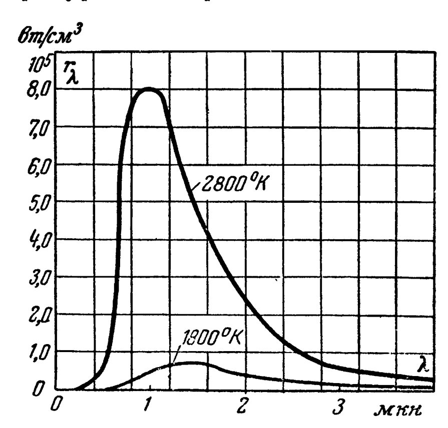
В тех случаях, когда почему-либо желательно сделать невидимым падающий на фотокатод луч света, обычно работают в инфракрасной части спектра. В этом случае перед линзой *4* крепится инфракрасный светофильтр, поглощающий видимую часть спектра.

В качестве светофильтра можно воспользоваться светофильтрами марок КС-11, КС-12 либо тонким листком эбонита (марблитовый светофильтр).

Выбор фотоэлемента в первую очередь определяется тем участком спектра, в котором он должен работать. В этом участке спектра выбранный фотоэлемент должен обладать хорошей чувствительностью, позволяющей соз-

дать на нагрузочном сопротивлении в цепи анода такое падение напряжения, которое достаточно для надежной работы фотореле.

Из фиг. 39 мы видели, что с понижением напряжения лампы с вольфрамовой нитью понижаются ее температура и излучаемый ею лучистый поток. Понижение температуры с уменьшением напряжения, падающего на вольфрамовой нити, может быть представлено в виде: $\frac{T}{T_0}=\left(\frac{U}{U_0}\right)^{\alpha}$, где $T_0$ и $U_0$ — первоначальные значения абсолютной температуры и напряжения, а $T$ и $U$ — их значе-




Фиг. 42. Кривые распределения спектрального излучения вольфрама при температурах 2 800° К и 1 800° К.

ния после изменения; $\alpha$ — постоянный коэффициент. Для ламп без газового наполнения, для которых $T_0 = 2\,450°$ К, $\alpha = 0{,}345$.

Для малых ламп с газовым наполнением (так называемых полуваттных ламп) $T_0 = 2\,800°$ К и $\alpha = 0{,}398$. Допустим, что применяются лампы, для которых $T_0 = 2\,800°$ К. Тогда при понижении $U_0$ на 10% получим: $T = 0{,}9^{0{,}398} \cdot 2\,800 \approx 1\,800°$ К.

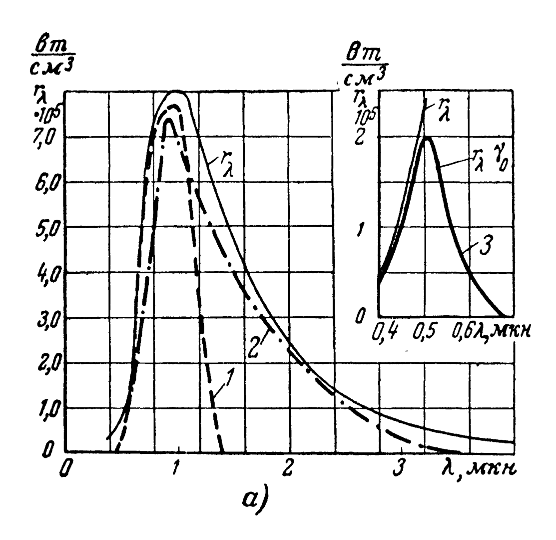
Зависимость спектральной плотности излучения вольфрама $r_\lambda$ от $\lambda$ для абсолютных температур 2 800 и 1 800° К приведена на фиг. 42. Из фигуры следует, что понижение напряжения на 10% уменьшает спектральную плотность излучения $r_\lambda$ приблизительно в 10 раз.

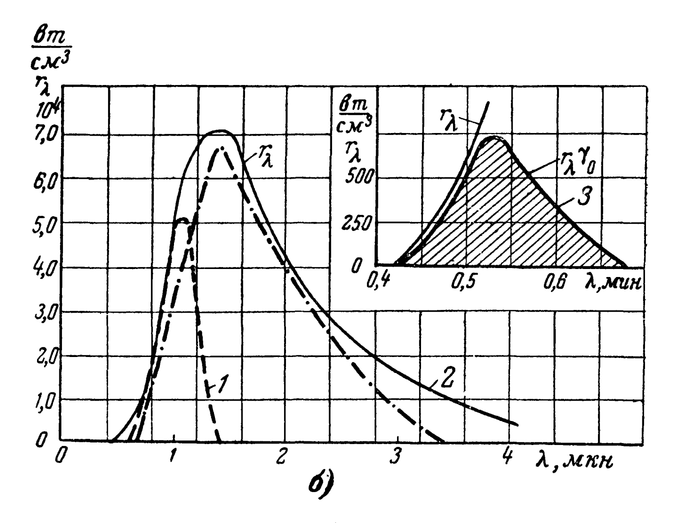
Рассмотрим сейчас, какие фотоэлементы и при какой температуре источника света целесообразнее применять в задачах фотоэлектронной автоматики. На фиг. 43 для удобства пользования кривые $r_\lambda$, выражающие зависимость $r_\lambda$ от $\lambda$ для температур 2 800 и 1 800° К, показаны на двух отдельных графиках. Внутри площади, ограниченной кривыми $r_\lambda = \varphi(\lambda)$ и осью $\lambda$, вписаны кривые, выражающие зависимости $r_\lambda \gamma_0 = \varphi(\lambda)$ для серно-свинцового фотосопротивления (PbS) и вентильного фотоэлемента ФЭСС. Кривые $r_\lambda = \varphi(\lambda)$ и $r_\lambda \gamma_0 = \varphi(\lambda)$ сурьмяно-цезиевого (SbCs) фотоэлемента, основанного на внешнем фотоэффекте, ввиду их малого масштаба показаны рядом в правых углах графиков *а* и *б*. Из кривых следует, что весь излучаемый поток наиболее эффективно поглощается серно-свинцовым фотосопротивлением как при $T = 2\,800°$ К, так и при $T = 1\,800°$ К. Вентильный фотоэлемент ФЭСС довольно хорошо поглощает излучаемый поток (хотя и не так, как PbS) при $T = 2\,800°$ К. Его использование менее эффективно при $T = 1\,800°$ К, но еще вполне возможно. Фотоэлемент с сурьмяно-цезиевым катодом гораздо менее эффективно использует излучаемый лампой поток, особенно при $T = 1\,800°$ К.

Беря произведение $r_\lambda$ на $\gamma_0$ для ряда значений $\lambda$, читатель может сам определить целесообразность применения в рассмотренных выше условиях ряда других фотоэлементов.

Величина фототока $I$, получаемого в цепи фотоэлемента, в зависимости от характера излучения будет различной. Если используется полный (интегральный) поток, излучаемый источником света, то величина фототока $I_\int = s\gamma_{\lambda\,макс}\, Q$, где $s$ — в случае лампы с вольфрамовой нитью — поверхность тела накала, *см*²; $\gamma_{\lambda\,макс}$ — квантовая чувствительность фотокатода, *а/вт*; $Q = \int\limits_0^{\lambda_{гр}} \gamma_0 r_\lambda d\lambda$ * — площадь, ограниченная соответствующей кривой $\gamma_0 r_\lambda$ и осью $\lambda$. Например, в случае сурьмяно-цезиевого фотокатода при $T = 1\,800°$ К эта площадь на графике фиг. 43,*б*

* Величина $Q$ есть определенный интеграл от величины $\gamma_0 r_\lambda$ по $d\lambda$, где $\gamma_0 r_\lambda$ являются переменными величинами, зависимыми от $\lambda$, взятыми в интервале изменения $\lambda$ от 0 до $\lambda_{гр}$.




Фиг. 43. Кривые $r_\lambda \gamma_0 = \varphi(\lambda)$, характеризующие интегральную чувствительность вентильного фотоэлемента ФЭСС-У (*1*), серно-свинцового ФС (*2*) и сурьмяно-цезиевого вакуумного фотоэлемента (*3*) при двух значениях температуры излучения вольфрама.

*а* — при 2 800° К; *б* — при 1 800° К.

заштрихована. Для приближенной оценки величины $Q$ достаточно прикинуть число больших клеток, ограничивающих площадь $Q$. Так, например, для кривой SbCs фотокатода площадь $Q$ составляет семь клеток. Линейный масштаб сторон клетки составляет по оси $r_\lambda$ 250 *вт/см*³, а по оси $\lambda$ 0,05 *мкн*.

Чтобы расчет был верен, следует $\lambda$ выражать не в микронах, а в сантиметрах. Таким образом, по оси $\lambda$ масштаб составит $5 \cdot 10^{-6}$ *см*, а площадь одной клетки $q = 250 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \frac{вт \cdot см}{см^3} = 1{,}25 \cdot 10^{-3}$ *вт/см*².

Рассмотрим пример. Необходимо определить фототок $I_\int$ при $s = 0{,}1$ *см*² $\gamma_{\lambda\, макс} \approx 42$ *ма/вт*$=4{,}2 \cdot 10^{-2}$ *а/вт* для SbCs фотокатода при лампе с вольфрамовой нитью, имеющей температуру $T = 1\,800°$ К в предположении, что весь поток, излучаемый лампой, падает на поверхность катода фотоэлемента. Считая согласно графику *б* фиг. 43

$$Q \approx 7q = 7 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-3} = 8{,}75 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2,$$

получим.

$$I_\int = s\gamma_{\lambda\, макс} \cdot Q = 0{,}1 \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 8{,}75 \cdot 10^{-3} = 3{,}7 \cdot 10^{-5} \text{ а}.$$

При облучении монохроматическим потоком поступают аналогичным образом, однако здесь следует учитывать, что по оси $\lambda$ отрезок $\Delta\lambda$ крайне мал.

Пусть, например, в рассмотренном выше графике для SbCs фотокатода при $T=1\,800°$ К световой поток проходит через монохроматический светофильтр с шириной пропускания 100 Å, что соответствует 0,01 *мкн*, или $10^{-6}$ *см*, а на графике в масштабе $\lambda$ 0,2 большой клетки.

Тогда для $\lambda=0{,}52$ *мкн*, при котором $\gamma_0 r_\lambda = 700$ *вт/см*³, получим: $Q=700 \cdot 10^{-6}$ *вт/см*², а следовательно, фототок $I_\lambda = s\gamma_{\lambda\, макс} \cdot Q = 0{,}1 \times 4{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 7 \cdot 10^{-4} \approx 3 \cdot 10^{-6}$ *а*. При тех же условиях в случае $T = 2\,800°$ К получим: $I_\lambda=0{,}1 \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}25 = 1 \cdot 10^{-3}$ *а*.

Выше мы сделали допущение, что весь световой поток, излучаемый источником света, попадает на фотокатод. В действительности лучистый поток излучается накаленной нитью во все стороны неравномерно. Обычно распределение потока характеризуется *кривыми светораспределения*. Если даже для простоты рассмотрения задачи положить, что поток излучается равномерно во все стороны, то при отсутствии какой-либо собирающей оптики на поверхность фотокатода упадет лишь малая часть всего потока, величина которой определяется телесным углом, под которым с поверхности фотокатода видна нить накала лампы. Напомним, что *телесным углом* называется угол, под которым мы видим ту или иную поверхность. Единицей телес-

ного угла является угол в один *стерадиан*, т. е. такой телесный угол $\omega$, который на шаровой поверхности, описанной из вершины угла (центра нити накала), вырезает площадь $S$, равную квадрату радиуса $r$ шара.

Математически это значит, что $\omega = \frac{S}{r^2}$. Если положить накаленное тело в виде точки, то на площадь фотокатода, равную 10 *см*² и удаленную от источника на 1 *м*, упадет часть полного потока $F$, пропорциональная $\frac{S}{r^2} = \frac{10}{100^2} = 10^{-3}$, т. е. $F_1 = 10^{-3}F$.

Поэтому с целью увеличения коэффициента использования источника света впереди источника света располагают линзы, а позади него — вогнутые зеркальные поверхности.

Действительно, располагая на расстоянии $r=5$ *см* от светящегося тела нити линзу диаметром $D=4$ *см*, получим:

$$\omega \approx \frac{\pi D^2}{4r^2} = \frac{3,14 \cdot 4^2}{4 \cdot 5^2} = 0,5,$$

а позади на расстоянии $r$ от светящегося тела нити собирающее зеркало такого же диаметра $D$, — получим отражение в виде параллельного пучка лучей с телесным углом $\omega \approx 0,5$. Таким образом, на фотокатод будет направлен пучок лучей с телесным углом $\omega=1,0$ стерадиану. Напомним, что полный телесный угол шара составляет 12,57 стерадиана. Следовательно, если не учитывать потерь за счет неполного отражения зеркала и частичного поглощения света в стекле линзы, поток, направляемый параллельным пучком на фотокатод, достигнет $F_2 = \frac{F}{12,57} = 0,08F$. Этот поток упадет на поверхность $S_1 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 4^2}{4} = 12,5$ *см*², что несколько больше активной поверхности фотокатода, а следовательно, практически фотокатода с поверхностью $10^2$ *см* достигнет поток

$$F_1 = \frac{10}{12,5} F_2 = 0,8 \cdot 0,08F = 0,064F.$$

В рассмотренном выше примере с SbCs фотокатодом, облученным потоком от лампы, температура нити которой $T = 1\,800°$ K, получим:

а) в случае монохроматического потока фототок

$$I_\lambda = 0,064 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 1,9 \cdot 10^{-8}\ a;$$

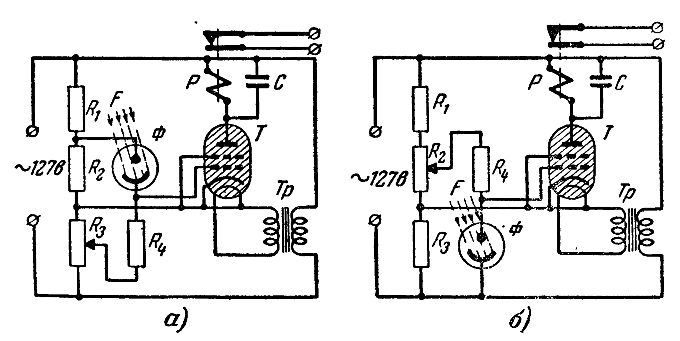
б) в случае полного потока фототок

$$I_\int = 0,064 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 6,4 \cdot 10^{-5}\ a.$$

При практических расчетах достаточно лишь определения порядка величин потока и фототока, так как спектральные характеристики фотоэлементов в силу многих разнообразных причин могут иногда заметно различаться у отдельных экземпляров фотоэлементов одного и того же типа. Точно так же с течением времени могут начать изменяться и спектральные характеристики излучения. В инфракрасной части спектра имеет место значительное увеличение потерь за счет поглощающих свойств стекла. Очевидно, полный учет всех возможных потерь и погрешностей не может проводиться при расчете радиолюбительской фотоэлектрической аппаратуры.

## СХЕМЫ ФОТОРЕЛЕ

Ниже будут рассмотрены наиболее типичные схемы фотореле, основанные на применении различных видов фотоэлементов. Во всех случаях, там, где необходимо осуществить питание фотоэлемента, оно производится от того же источника, что и питание анодной цепи усилителя.




Фиг. 44. Схемы фотореле с применением вакуумного или газонаполненного фотоэлементов и тиратроном ТГ1-0,1/1,3.
*а* — схема установлена „на свет"; *б* —схема установлена „на темноту".

На фиг. 44 показаны наиболее простые схемы фотореле с применением вакуумных или газонаполненных фотоэлементов и тиратронов.

Схема *а* установлена «на свет». Если фотоэлемент не освещен, то в положительный полупериод напряжения переменного тока (по отношению к аноду тиратрона) на управляющую сетку тиратрона $T$ через сопротивление $R_4$ подается отрицательное смещение, получаемое в результате падения напряжения на сопротивлении $R_3$. Напряжение

смещения снимается с части сопротивления $R_3$ между катодом и движком. В этом случае тиратрон не зажжен и ток через обмотку электромагнита не течет.

Когда фотоэлемент освещен, фототок течет через фотоэлемент и нагрузочное сопротивление $R_4$, падение напряжения на котором, обусловленное фототоком, создает положительное смещение на управляющей сетке тиратрона. При правильно подобранных параметрах $F$, $\gamma$ и $R_4$, напряжении питания и смещения, получающегося на сопротивлении $R_3$, при освещении фотоэлемента происходит зажигание тиратрона и электромагнит $P$ срабатывает.

Схема *б* установлена «на темноту». В этой схеме в положительный полупериод напряжения переменного тока отрицательное смещение на управляющую сетку тиратрона $T$, снимаемое с сопротивления $R_3$, подается через внутреннее сопротивление фотоэлемента лишь в том случае, когда он освещен. Если преградить свет, падающий на фотоэлемент, то на управляющую сетку тиратрона будет подано положительное смещение, снимаемое с части сопротивления $R_2$ через сопротивление $R_1$, произойдет зажигание тиратрона и электромагнит $P$ сработает.

Конденсатор $C$, включенный параллельно обмотке электромагнита, служит для уменьшения дрожания его якоря вследствие питания схемы переменным током с частотой 50 *гц*.

Выбор того или иного варианта схемы фотореле определяется экономическими соображениями и условиями использования светового барьера.

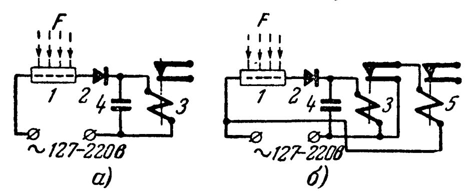
Значения сопротивлений $R_1$, $R_2$ и $R_3$, а также других элементов обоих вариантов схем фотореле, изображенных на фиг. 44, при использовании вакуумных или газонаполненных фотоэлементов приведены в табл. 8.

*Таблица 8*

| Схема фиг. 44 | Тип фотоэлемента | $R_1$ | | $R_2$ | | $R_3$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *ом* | *вт* | *ом* | *вт* | *ом* | *вт* |
| *а* | Вакуумный | 0 | — | 20 000 | 1 | 1 000 | 1 |
| *а* | Газонаполненный | 10 000 | 0,5 | 9 000 | 0,5 | 1 000 | 1 |
| *б* | Вакуумный | 0 | — | 5 000 | 4 | 100 | 1 |
| *б* | Газонаполненный | 3 000 | 2 | 2 000 | 1 | 100 | 1 |

Остальные данные схемы: $R_4$ = 1 — 10 *мгом*; $C$ = 2 — 8 *мкф*; *Тр* — трансформатор накала (6,3 *в*, 0,6 *а*); $T$ — тиратрон ТГ1-0,1/1,3.

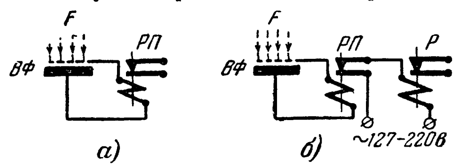
Включение однокаскадных фотоумножителей типа ФЭУ-1 и ФЭУ-2 принципиально ничем не отличается от включения вакуумных фотоэлементов. Чтобы создать между фотокатодом и эмиттером падение напряжения 170 *в*, между фотокатодом и $+U_a$ включается делитель напряжения (высокоомный потенциометр), к средней точке которого (движку) подключается эмиттер.




Фиг. 45. Простейшие схемы фотореле с ФС.
*а* — одноступенчатое; *б* —двухступенчатое.

На схемах *а* и *б* фиг. 45 приведены фотореле с фотосопротивлениями.

На схеме *а* показано одноступенчатое фотореле, питающееся непосредственно от сети переменного тока. Последовательно с фотосопротивлением *1* включены селеновый (или германиевый) выпрямитель *2* и поляризованное реле *3*, через обмотку которого течет выпрямленный ток. Для




Фиг. 46. Простейшие схемы фотореле с ФЭСС.
*а* — одноступенчатое; *б* —двухступенчатое.

уменьшения пульсаций обмотка реле зашунтирована конденсатором *4*.

Схема *б* изображает двухступенчатое фотореле. При срабатывании реле *3* его контакты включают цепь питания мощного реле *5*, питающегося непосредственно от сети переменного тока. В качестве реле *3* могут быть использованы поляризованные реле типа РП-5, срабатывающие при токе 0,1 *ма*, а также телефонные реле, ток срабатывания которых не превышает 1 *ма*. В качестве реле *5* можно использовать реле типа МКУ-48. Рабочее напряжение реле 220 *в*. Разрывная мощность его контактов составляет 500 *ва* переменного тока.

На фиг. 46 приведены две схемы фотореле с вентильными фотоэлементами ФЭСС. На схеме *а* показано одноступенчатое фотореле. В качестве реле используются низкоомные чувствительные реле. Для этой цели подходят некоторые поляризованные реле типа РП. В тех случаях, когда разрывная мощность контактов одноступенчатого реле мала, применяется схема *б* двухступенчатого фотореле. В этой схеме первое реле включает цепь питания второго (мощного) реле, питающегося непосредственно от сети переменного тока или иного источника. Инерционность фотореле определяется в данном случае инерционностью мощного реле.

## ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОРЕЛЕ

**Техника безопасности на штампе.** При работе на штампе (прессе, молоте и подобных им устройствах) требуется исключительное внимание рабочего. Продвигая под штамп металлическую ленту, из которой штампуются детали, рабочий должен делать это достаточно быстро, но осторожно, чтобы рука, которая обычно ближе продвигается к штампу, не попала под штамп.

Назначение фотореле заключается в исключении возможности несчастного случая. От фотореле требуется максимум надежности. Чтобы это обеспечить, фотореле должно содержать минимум перегорающих или изнашивающихся элементов. Этой задаче наиболее отвечает схема *б* фиг. 46.

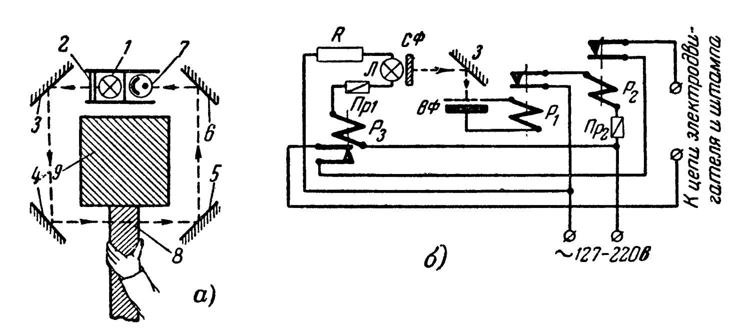
Учитывая то обстоятельство, что цех, где расположен штамп, бывает освещен дневным светом либо рассеянным светом потолочных электрических ламп, фотореле должно работать в инфракрасной части спектра. Величина лучистого потока должна быть в допустимой мере настолько велика, чтобы имело место существенное превышение рабочего потока над посторонним потоком, освещающим фотоэлемент. Электрическая лампа осветителя должна быть подключена к той же питающей линии, что и электродвигатель штампа. В фотореле необходимо устанавливать электрические лампы, не бывшие в употреблении, и заменять их до окончания гарантированного срока работы новыми. Необходимо также предусмотреть реле, которое выключает цепь электродвигателя штампа при перегорании электрической лампы фотореле.

Если с боков и сзади штамп не огражден, то следует применить оптическую схему *а*, изображенную на фиг. 47. Согласно этой схеме луч света, излучаемого лампой *1*, пройдя через инфракрасный светофильтр *2*, падает на зеркало *3*, стоящее под углом 45° к падающему лучу. Отразившись от зеркала *3*, этот луч падает на зеркало *4*, затем на зеркала *5* и *6*, расположенные также под углом 45°, после чего он попадает на фотоэлемент *7*. Так как для ФЭСС $\lambda_{гр} = 1{,}4$ *мкн*, то поглощение стеклянных линз будет невелико, и применение их вполне допустимо. Осветитель и фотоэлемент могут быть заключены в общую арматуру, которая должна удовлетворять перечисленным ранее условиям. Там же могут быть помещены и реле. Схема *б* фиг. 47 изображает возможную электрическую схему всей системы защиты.

Произведем расчет режима фотореле. В качестве источника света воспользуемся нормальной осветительной лампой НВ25 на 220 *в* мощностью 40 *вт*, а в качестве фотоэлемента — вентильным фотоэлементом ФЭСС-У-10 чувствительностью 4 000 *мка/лм*.

Допустим, что работа лампы происходит при пониженном напряжении, соответствующем $T = 1\,800°$ К, а излучающая поверхность нити 0,1 *см*². Тогда согласно графику *б* фиг. 43 площадь $Q = \gamma_0 r_\lambda \Delta\lambda$ составит 1,8 *вт/см*². Исходя из $\gamma_{\lambda\,макс} = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ *а/вт* при $T = 1\,800°$ К, получим: $I_\int = 0{,}1 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot 1{,}8 = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$ *а*.

В действительности используется не весь поток, а лишь небольшая его часть. Допустим, что, применив сферическое зеркало и линзу, нам удалось направить на фотокатод $0{,}1F$. Тогда фототок, протекающий через реле $P_1$ (фиг. 47,*б*), окажется равным 450 *мка*. Этот ток вполне достаточен для надежного срабатывания поляризованного




**Фиг. 47. Фотореле для повышения техники безопасности при работе на штампе.**

*а* — оптическая схема; *б* — электрическая схема.

реле РП4 (номер по каталогу У. 172. 20.30/Э, см. табл. 7), общее сопротивление обмотки которого равно 580 *ом*.

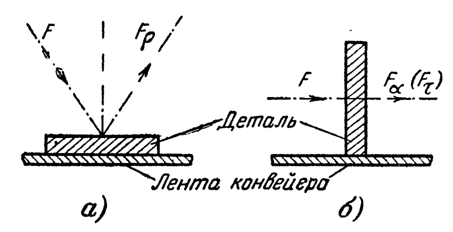
Рабочий фототок может быть легко увеличен путем уменьшения величины сопротивления *R*, включенного последовательно с осветительной лампой *Л*.

Для размыкания цепи электродвигателя (и включения цепи тормозной электромагнитной муфты), управляющего штампом, следует воспользоваться мощным реле (электромагнитом) переменного тока $P_2$, обмотка которого должна питаться от той же линии, что и лампа осветителя. Последовательно с лампой осветителя на схеме *б* фиг. 47 показаны балластное сопротивление *R* и низковольтное реле переменного тока $P_3$, предназначенное для размыкания цепи электродвигателя штампа при перегорании лампы *Л*.

**Счет деталей на конвейере.** При производстве массовой продукции необходим счет готовых деталей, движущихся на конвейере. В некоторых случаях требуется осуществить автоматический контроль качества деталей по одному или нескольким важнейшим параметрам с автоматическим удалением с конвейера забракованных деталей.

Мы рассмотрим более простую задачу, а именно счет готовых деталей. В зависимости от оптических свойств детали, характеризуе-

мых ее коэффициентами отражения, пропускания и поглощения, оптическая схема может быть различной. Так, например, если *коэффициент отражения* $\rho = \frac{F_\rho}{F}$ велик (где $F$ — поток, упавший на поверхности детали, а $F_\rho$ — поток, отраженный от ее поверхности), то оптическая схема должна иметь вид, показанный на схеме *а* фиг. 48. Если деталь не пропускает упавший на нее поток, т. е. хорошо его поглощает и плохо отражает, то велик *коэффициент поглощения* $\alpha = \frac{F_\alpha}{F}$. Здесь $F_\alpha$ — поток, поглощенный поверхностью детали. В случае счета стеклянных изделий, например таких, как молочная или фармацевти-




Фиг. 48. Оптические схемы, используемые для счета деталей на конвейере.
*а* — деталь отражает свет; *б* — деталь поглощает либо пропускает свет.

ческая посуда, которые поглощают лишь часть упавшего на них потока и характеризуются *коэффициентом пропускания* $\tau = \frac{F_\tau}{F}$ (где $F_\tau$ — поток, прошедший через поверхности детали), то при регистрации изделия имеет место ослабление потока $F$ до величины $F_\tau$. В последних двух случаях применяется схема *б*, показанная на фиг. 54.

Так как конвейер с деталями обычно достаточно освещен, то для фотореле можно рекомендовать работу в инфракрасной части спектра либо модуляцию лучистого потока. Применяем первый вариант как более простой, используя в качестве приемника излучения серно-свинцовое фотосопротивление.

Граница прозрачности стекла для инфракрасного излучения соответствует 2,2, а кварца 3,5 *мкн*.

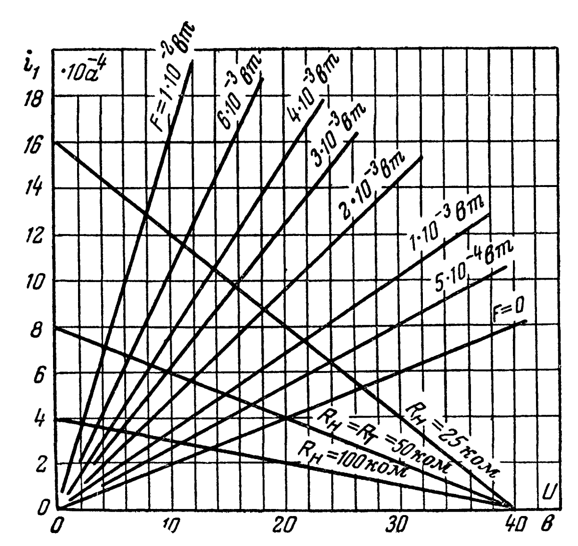
Учитывая это обстоятельство, применение стеклянных линз недопустимо, а кварцевых — нежелательно вследствие их дороговизны. Поэтому для концентрации излучаемого лампой потока достаточно ограничиться одним сферическим зеркалом, расположенным на оптической оси источник света — фотоэлемент позади источника света.

Так как серно-свинцовые ФС типа ФС-А1 или ФС-А4 обладают фоточувствительной поверхностью $S$=28 *мм*$^2$, то чтобы более эффективно использовать концентрируемый поток, необходимо направить на фотокатод не параллельный, а сходящийся пучок, с тем чтобы на расстоянии *l см* от источника света основная часть потока падала на активную поверхность фотоэлемента. Посредством эллипсоидального зеркала мы сможем направить на катод PbS—ФС приблизительно 0,1 всего потока, излучаемого лампой.

Допустим, что в качестве источника света взята автомобильная лампа А-16 (см. приложение 1), которая при напряжении 6 *в* имеет мощность 1,88 *вт*. Предположим, что эта лампа работает в пониженном режиме накала при $T=1\,800°$ К. Тогда согласно кривой $\gamma_0 r_\lambda$, приведенной на графике *б* фиг. 43 для PbS—ФС, находим: $Q = 4$ *вт/см*². Однако, применяя инфракрасный светофильтр, отсекающий излучение короче $\lambda=1{,}2 \div 1{,}4$ *мкн*, мы уменьшим $Q$ до $Q_1 \approx 3$ *вт/см*².

Принимая излучающую поверхность нити $s = \pi u h = 3{,}14 \cdot 0{,}02 \cdot 0{,}5 = 3{,}14 \cdot 10^{-2}$ *см*², получим: $F_1 = 0{,}1 sQ = 0{,}1 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \approx 1 \cdot 10^{-2}$ *вт*.

Поток $F_1$ вызовет в фотосопротивлении фототок $i_ф = KUF_1$, где $K$ — удельная чувствительность фотосопротивления, *а/вт·в*, а $U$ —




Фиг. 49. Вольтамперные характеристики селенового вентильного фотоэлемента при разных значениях сопротивления нагрузки.

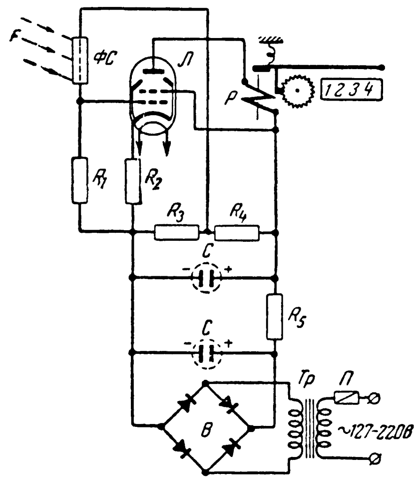
падение напряжения на фотосопротивлении. Задавшись $R_н = R_m$, определяем темновой ток $i_m = \frac{U_m}{R_m}$, откуда находим световой ток $i_c = i_m + i_ф$.

Вместо вычислений токи $i_m$ и $i_c$ удобнее определять графически. На фиг. 49 построены вольтамперные характеристики PbS—ФС, вычисленные, исходя из удельной чувствительности PbS—ФС $K = 14 \times 10^{-3}$ *а/вт·в* для ряда значений $F$, в том числе для $F=0$.

Допустим, что $R_m = R_н$ и $U_m = 20$ *в*. Тогда напряжение источника питания $U_u = 2U = 40$ *в*. Восставив из абсциссы со значением $U=20$ *в* перпендикуляр до пересечения с прямой $F=0$, проводим через точку пересечения и абсциссу $U = 40$ *в* нагрузочную прямую $R_н = 50$ *ком*. Координаты, образуемые пересечением нагрузочной прямой с линиями

потоков $F$, позволяют определить световое сопротивление $R_c = \frac{U_c}{i_c}$ и мощность $W_c = U_c i_c$, рассеиваемую на фотосопротивлении. Для рассматриваемого нами случая $F_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ *вт* и $R_н = R_m = 50$ *ком* при $U_m = 20$ *в* имеем $i_m = 4 \cdot 10^{-4}$ *а*, $i_c = 7 \cdot 10^{-4}$ *а*, $R_c = 5{,}7 \cdot 10^3$ *ом* и $W_c = 2{,}8 \cdot 10^{-3}$ *вт*.

Телефонный счетчик, у которого две обмотки, соединенные последовательно, имеют общее сопротивление, равное 1 000 *ом*, надежно срабатывает при токе 48 *ма*. Следовательно, фототок $i_ф = i_c - i_m = 3 \cdot 10^{-4}$ *а* необходимо усилить в $k = \frac{48}{0{,}3} = 160$ раз, скомпенсировав смещение, создаваемое темновым током $i_m$.




Фиг. 50. Схема фотореле для счета деталей на конвейере.

Фотореле можно собрать по схеме, изображенной на фиг. 50. Питание ФС осуществляется за счет падения напряжения на сопротивлении $R_3$ делителя, состоящего из сопротивлений $R_3$ и $R_4$. Когда фотосопротивление не освещено, плюсом на управляющую сетку подается смещение $i_m R_1$. Чтобы обеспечить отпадание якоря реле $P$, что имеет место при токе $I_{a1}$, на управляющую сетку подается отрицательное смещение $I_{a1}R_2 - i_m R_1$.

Когда на ФС падает поток $F_1$, то через сопротивление $R_1$ течет ток $i_c$, подающий на управляющую сетку положительное смещение $i_c R_1$. Анодный ток лампы $Л$ возрастает до значения $I_{a2}$, при котором реле $P$ срабатывает. При этом на управляющую сетку подается положительное смещение $i_c R_1 - I_{a2} R_2$.

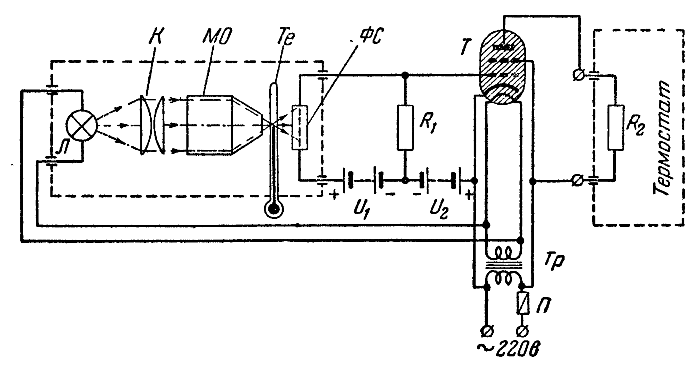
**Контроль уровня жидкости в баке.** В ряде производств необходимо, чтобы уровень жидкости, заполняющей бак, не превысил заданного значения. Достижение допустимого уровня может контролироваться либо путем отражения жидкостью падающего на поверхность луча света на фотоэлемент (см. схему *а* фиг. 48), либо путем изменения коэффициентов поглощения или пропускания среды между источником света и фотоэлементом в результате заполнения бака жидкостью (см. схему *б* фиг. 48).

Ввиду того что доступ света внутрь бака исключен, фотореле может работать в видимой части спектра. Для решения этой задачи в качестве фотоэлемента можно воспользоваться однокаскадным фотоумножителем ФЭУ-2, а в качестве источника света — автомобильной лампой А-16.

Заполнение бака жидкостью осуществляется посредством насоса, приводимого в действие электродвигателем большой мощности. Ввиду этого для усиления фототока применима схема с тиратроном, в анодной цепи которого включена обмотка мощного электромагнита (контактора). Если по достижении жидкостью требуемого уровня световой поток появляется в фотоэлементе (схема *а* фиг. 48), применим установленную «на свет» схему *а* фиг. 44. В том случае, когда при достижении жидкостью заданного уровня свет прекращается или ослабляется, применим схему *б* фиг. 44, установленную «на темноту».

Выбор величин светового потока и фототока в цепи управляющей сетки тиратрона, а также параметров электромагнита читатель может сделать сам при решении конкретной задачи по аналогии с рассмотренными выше примерами.

Аналогично с контролем уровня жидкости в баке осуществляется контроль сыпучих тел, заполняющих бункер, элеватор и т. п.




Фиг. 51. Схема автоматического регулирования температуры термостата с непосредственным подогревом обмотки термостата током, текущим через тиратрон.

**Автоматическое регулирование температуры.** Автоматическое регулирование температуры находит применение в разнообразных областях: регулировании металлургического процесса; инкубаторах, применяемых на птицефермах; лабораторных термостатах и т. д. Регулирование может осуществляться: при одной фиксированной температуре и по заданной, подчас сложной температурной программе, при сравнительно низких и очень высоких температурах. Решение одной и той же задачи регулирования температуры может осуществляться применением различных *датчиков*, т. е. различных приемных элементов, воспринимающих воздействие управляющего параметра, которым в данном случае является температура.

В качестве датчиков температуры применяются термопары, термометры сопротивления, термисторы, ртутные и газовые термометры (терморегуляторы), биметаллические терморегуляторы, пирометры и пр.

Автоматическое регулирование температуры, основанное на применении фотореле, сводится к оптическому контролю подвижного элемента датчика: ртути в капилляре ртутного термометра, стрелки измерительного прибора и т. д.

Оптическая схема (фиг. 51) контроля температуры ртутного термометра сводится к следующему: лучи света электрической лампочки *Л*,

заключенной в светогерметичную арматуру, направляются через конденсор $K$ и микрообъектив $MO$ на капилляр термометра $Te$, позади которого расположен фотоэлемент $ФС$. Микрообъектив и фотоэлемент располагаются таким образом, чтобы пучок лучей, проходящих через микрообъектив, сходился в месте расположения капилляра, а расходящийся пучок света падал на всю чувствительную поверхность фотоэлемента. Источник света, оптика, термометр и фотоэлемент могут быть заключены в арматуру, через которую выведен наружу лишь шарик термометра, содержащий основную массу ртути.

Когда ртуть в капилляре не заслоняет падающий на фотоэлемент поток, возникает фототок и происходит нагревание объекта. При преграждении потока ртутью термометра фототок отсутствует и прекращается нагревание объекта. На фиг. 51 изображена схема, позволяющая осуществить регулирование температуры термостата, согласно которой включение и выключение тока, текущего через подогревную обмотку, осуществляются без применения электромагнита за счет появления и исчезновения тока, протекающего через подогревную обмотку термостата $R_2$, включенную непосредственно в анодную цепь тиратрона.

В качестве источника света используется миниатюрная лампа низкого напряжения типа МН7 (см. приложение 1) либо лампочка карманного фонаря. В качестве фотоэлемента наиболее целесообразно воспользоваться BiS-ФС типа ФСБ-2.

Управляющее напряжение тиратрона, создаваемое фототоком $i_{cp}$, протекающим через сопротивление $R_1$, достаточно для зажигания тиратрона, анодное питание которого осуществляется через подогревную обмотку термостата непосредственно от сети переменного тока. Питание фотосопротивления осуществляется от батареи напряжением $U_1$, а отрицательное смещение — от другой батареи напряжением $U_2$, разряжаемых сравнительно слабыми токами. При желании эти батареи могут быть заменены соответствующими выпрямителями и питание их осуществляется совместно с трансформатором накала тиратрона от сети переменного тока.

В том случае, если из расчета следует, что с выбранными источниками света и фотоэлементами нельзя обеспечить требуемое напряжение зажигания тиратрона $U_з = i_c R_1$, где $i_c$ — световой ток фотосопротивления, а дальнейшее увеличение потока $F$ либо сопротивления $R_1$ недопустимо, следует применить предварительное усиление фототока.

*Глава седьмая*

# ИЗМЕРЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ ПРИ ПОМОЩИ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

## ФОТОМЕТРИЯ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФОТОМЕТРЫ И СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ

*Фотометрией* называется наука об измерении лучистой энергии. Еще несколько десятков лет назад все важнейшие приборы, предназначенные для измерений в видимой части спектра, были основаны на визуальных измерениях, в которых основным светочувствительным органом являлся

глаз. Как известно, глаза человека являются весьма чувствительными, но субъективными органами, которым присущи свои недостатки.

Важнейшими недостатками глаза с точки зрения применения его в фотометрических измерениях являются спектральная селективность и инерционность. Кроме того, глаз одного человека отличается от глаза другого человека некоторым различием в кривой спектральной чувствительности, в абсолютной чувствительности, в инерционности и других показателях. Спектральная чувствительность глаза, характеризуемая кривой относительной видности $k_\lambda = \varphi(\lambda)$, меняется с изменением освещенности глаза. Так, при дневном зрении $\lambda_{макс} = 0{,}555$ *мкн*, тогда как с уменьшением освещенности происходит смещение $\lambda_{макс}$ в сторону более коротких волн, достигающее $\lambda_{макс} = 0{,}51$ *мкн* при сумеречном зрении, когда глаз приспособился (адаптировался) к темноте.

Указанные выше недостатки глаза и фотометрических приборов, основанных на визуальных измерениях, в значительной мере исключаются применением в качестве приемников излучения фотоэлементов.

В фотометрии наибольшее применение нашли вентильные и вакуумные фотоэлементы благодаря тому, что у этих фотоэлементов фототок прямо пропорционален лучистому потоку, падающему на фотокатод.

В последние годы особенно широкое применение получили многокаскадные фотоумножители. Обладая теми же свойствами, что и вакуумные фотоэлементы, многокаскадные фотоумножители позволяют сравнительно просто увеличить фототок катода в сотни тысяч — сотни миллионов раз.

Фотометрия, основанная на применении фотоэлектрических фотометров, получила в последние годы исключительно широкое применение. Преимуществами большинства фотоэлектрических фотометров являются их высокая чувствительность, практически полная безинерционность и объективность. Точность измерений посредством фотоэлектрических фотометров зависит от их конструкций. Она может быть сделана очень высокой.

Наиболее простыми, но менее точными являются фотоэлектрические фотометры, основанные на методах непосредственного отсчета. Более сложными, но вместе с тем более точными являются фотоэлектрические фотометры, основанные на нулевых методах измерения.

Кроме измерений, проводимых в области спектральной чувствительности фотоэлемента, которая у ряда фотоэлементов шире видимой области спектра, фотоэлементы в сочетании с люминофорами позволяют регистрировать рентгеновское и ультрафиолетовое излучения, лежащие в более коротковолновой части электромагнитного спектра, а в сочетании с электронно-оптическими преобразователями — излучения инфракрасной части спектра.

Любые неоптические величины могут быть легко измерены путем преобразования измеряемой величины в оптическую. В качестве примера укажем, что запись механических колебаний либо перемещений может быть осуществлена укреплением легкого зеркальца либо покрытием колеблющейся (перемещающейся) поверхности зеркальным слоем распыленного алюминия; освещая зеркальную поверхность постоянным лучистым потоком некоторого источника, можно по изменению величины отраженного потока судить об изменении измеряемого неоптического параметра.

Фотоумножители в сочетании со специальными люминесцирующими веществами (кристаллофосфорами) используются в качестве сцинтилляционных счетчиков (т. е. приборов, считающих число световых мерцаний, вспышек), предназначенных для регистрации $\alpha$, $\beta$ и $\gamma$-излучений.

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

*Метод непосредственного отсчета* основан на том, что регистрируемый фототок прямо пропорционален измеряемому потоку.

Наиболее простыми схемами фотометров, основанных на методе непосредственного отсчета, являются схемы, в которых фототок регистрируется по гальванометру или микроамперметру, непосредственно включенному во внешнюю цепь фотоэлемента. Если $\alpha_0$ — число делений гальванометра при отсутствии измеряемого потока, а $\alpha$ — число делений при наличии его, то измеряемый поток

$$F_x = \frac{I}{\gamma} = \frac{C_i(\alpha - \alpha_0)}{\gamma},$$

где $C_i$ — токовая постоянная гальванометра, выраженная в амперах на деление $\left(C_i = \frac{1}{S_i}\right.$, где $S_i$ — чувствительность гальванометра в делениях на ампер).

В тех случаях, когда фототок мал или когда желательно регистрировать его более грубым прибором, при-

бегают к усилению фототока. В этих случаях обычно применяют усилитель постоянного тока (см. фиг. 13,*в*), обладающий коэффициентом усиления $K$. При усилении фототока поток $F_x = \frac{C_i(\alpha - \alpha_0)}{\gamma K}$.

Точность измерения фотометра характеризуется *относительной погрешностью* $\beta$ измеряемой величины $F_x$; а именно: $\beta = \frac{\Delta F_x}{F_x} \cdot 100\%$.

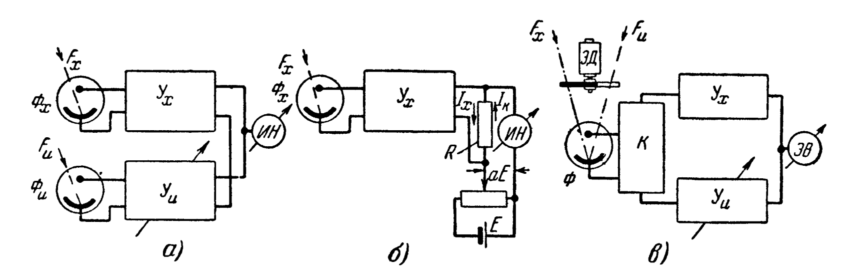
В рассмотренных выше фотоэлектрических фотометрах $\beta = \left(\frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) \cdot 100\%$, где $\frac{\Delta K}{K}$ — относительная погрешность, вносимая нестабильностью коэффициента усиления, зависящая от режима усилителя и выбранных элементов схемы; $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ — относительная погрешность фотоэлемента, зависящая от непостоянства внешней температуры и изменений напряжения; $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ — относительная погрешность отсчета показаний по шкале гальванометра. Так, например, если отсчет можно сделать с точностью $\pm 0{,}5$ деления, а отсчитываются 15 делений шкалы, то $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot 100 = \frac{0{,}5}{15} \cdot 100 = 3{,}3\%$. Чтобы уменьшить относительную погрешность $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot 100$, пользуются гальванометрами, на шкале которых можно отсчитать 200 и более делений. Проводя все измерения в интервале 100 — 200 делений, получим, что $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot 100\%$ при $\Delta\alpha = 0{,}5$ деления лежит в интервале $0{,}5 \div 0{,}25\%$.

Нулевые методы измерения основаны на сопоставлении измеряемого потока $F_x$ с известным потоком $F_u$. Добиваются равенства $F_x = aF_u$, устанавливая его наличие по индикатору нуля и определяя величину $a$ по соответствующему делению лимба, совпадающему с указателем.

В некоторых случаях сопоставляются не потоки, а токи, например фототок $I_x$ сопоставляется с известным током $I_u$. В этом случае добиваются равенства $I_x = aI_u$. Величина $F_x$ определяется в виде $F_x = \frac{aI_u}{\gamma}$, где $\gamma$ — чувствительность (интегральная либо спектральная в зависимости от условий задачи) фотоэлемента.

Существует ряд нулевых методов измерения потоков.

Ряд фотометров основан на *одновременном сопоставлении обоих сравниваемых потоков*, принцип которых ясен из схемы *а* фиг. 52. Сравниваемые потоки $F_x$ и $F_u$ падают на фотоэлементы $Ф_x$ и $Ф_u$, фототоки которых усиливаются соответственно усилителями $У_x$ и $У_u$. Уси-




Фиг. 52. Скелетные схемы фотоэлектрических фотометров, основанных на нулевых методах измерения.

*а* — одновременное сопоставление сравниваемых потоков; *б* — метод компенсации фототока известным током; *в* — метод поочередного сопоставления обоих сравниваемых потоков.

литель $У_u$ сделан таким образом, что, изменяя скачками и плавно его коэффициент усиления, можно добиться равенства усиленных фототоков, текущих навстречу друг другу через нуль-индикатор *ИН*. Равенство фототоков фиксируется при токе через индикатор $I_{ин} = 0$, а коэффициент $a$ определяется по показаниям переключателя и лимба, которые характеризуют величину отношения коэффициентов усиления усилителей, согласно которой $a = \frac{K_x \gamma_x}{K_u \gamma_u}$, где $\gamma_x$ и $\gamma_u$ - чувствительности фотоэлементов измеряемого и известного потоков.

Точность измерения при применении метода компенсации определяется стабильностью величин $F_u$, $K_x$, $\gamma_x$; $K_u$ и $\gamma_u$ и точностью их измерения и выражается в виде:

$$\beta = \left( \frac{\Delta F_u}{F_u} + \frac{\Delta K_x}{K_x} + \frac{\Delta \gamma_x}{\gamma_x} + \frac{\Delta K_u}{K_u} + \frac{\Delta \gamma_u}{\gamma_u} \right) 100\%.$$

Чтобы уменьшить число величин, от которых зависит точность измерения, прибегают к ряду мер. Например,

освещая всю поверхность одного и того же фотокатода одновременно двумя потоками $F_x$ и $F_u$, модулированными частотами $f_x$ и $f_u$, исходя из того, что в этом случае $\gamma_x = \gamma_u$, получим:

$$a = \frac{K_x}{K_u} \text{ и } \beta = \left(\frac{\Delta F_u}{F_u} + \frac{\Delta K_x}{K_x} + \frac{\Delta K_u}{K_u}\right) \cdot 100\%.$$

В случае схемы *б* фиг. 52, основанной на *методе замещения* (методе компенсации), усиленный фототок $I_x$ компенсируется током $I_к$. Степень компенсации определяется постоянством компенсирующего напряжения и точностью отсчета положения регулятора потенциометра, что достигается применением в качестве источника напряжения нормального элемента Вестона, а в качестве потенциометра — высокоомного декадного магазина сопротивлений. Измеряемый поток $F_x$ определяется согласно равенству $F_x = \frac{I_x}{\gamma} = \frac{I_к}{\gamma}$. Здесь $I_к = \frac{aE}{R}$, где $R$ — сопротивление нагрузки, включенное на выходе усилителя.

Схема *в* фиг. 52 поясняет принцип действия фотометров, основанных на *поочередном сопоставлении обоих сравниваемых потоков* (*метод мигания*). На оси электродвигателя *ЭД* расположен диск *Д*, одна из половин которого прозрачна, а другая непрозрачна для потоков $F_x$ и $F_u$. Таким образом, фотоэлемент *Ф* поочередно освещается потоками $F_x$ и $F_u$. Коммутатор *К* осуществляет переключение фототоков анодной цепи фотоэлемента на входы усилителей $У_x$ и $У_u$. Равенство усиленных фототоков $I_x = aI_u$ контролируется по нулевому индикатору, в качестве которого используется электронный вольтметр *ЭВ*. Указанное равенство будет иметь место при отсутствии пульсирующего напряжения на входе электронного вольтметра. Обязательным условием нормальной работы подобного фотометра являются синхронность и синфазность переключений коммутатора с переключением потоков $F_x$ и $F_u$ диском.

## ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИИ ТЕМНОВОГО ТОКА

*Порогом чувствительности фотометра* называется наименьшая величина потока, которая может быть им измерена с требуемой степенью точности или обнаружена. При измерении световых потоков, не превышающих

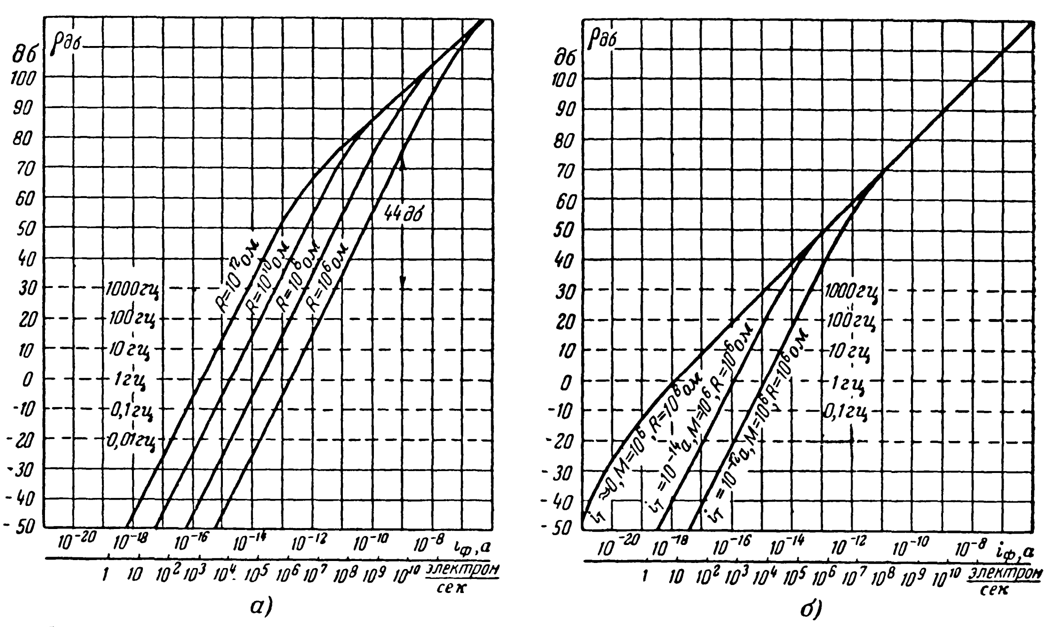
$10^{-8} \div 10^{-9}$ *лм*, порог чувствительности ограничивается главным образом коэффициентом усиления и величиной $\Delta\alpha$. В этом случае $F_{пор} = \frac{C_i \Delta\alpha}{\gamma K}$. При измерении более слабых световых потоков все возрастающую роль приобретают *внутренние электрические флюктуации*, т. е. шумы, создаваемые за счет хаотического движения электронов в проводниках, в частности в высокоомных сопротивлениях нагрузки, и шумы, создаваемые за счет дробовой природы электронного потока, обусловленного как фотоэмиссией, так и термоэмиссией внутри фотоэлемента.

Если выражать отношение напряжения сигнала $u_c$ к напряжению помехи $u_n$ (точнее, к корню квадратному от среднего квадрата напряжения помехи, т. е. $\sqrt{\overline{u_n^2}}$) через $\rho$, то $\rho^2 = \frac{u_c^2}{\overline{u_n^2}}$, где черта над $u_n^2$ означает, что взято среднее значение величины $u_n^2$.

В радиотехнике и акустике принято отношение двух сравниваемых величин, например мощностей $P_1$ и $P_2$, представляющее собой относительную величину $\frac{P_1}{P_2}$, выражать в относительных логарифмических единицах — *децибелах* (*дб*). Число децибел $n = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}$. Следовательно, если $P_1 > P_2$, то $n$ — положительное, а если $P_1 < P_2$, то $n$ — отрицательное число децибел. При $P_1 = 10P_2$ $\lg \frac{P_1}{P_2} = 1$, а $n = 10$ *дб*. Если $P_1 = 1\,000P_2 = 10^3 P_2$, то $\lg \frac{P_1}{P_2} = 3$, а $n = 30$ *дб*; при $P_1 = 0{,}01P_2 = 10^{-2}P_2$ $\lg \frac{P_1}{P_2} = -2$, а $n = -20$ *дб* и т. д.

Так как $\lg \rho^2 = 2 \lg \rho$, то, выражая $\rho^2$ в децибелах, получим: $\rho_{дб} = 20 \lg \rho$. Если построить зависимость $\rho_{дб}$ от фототока катода $i_{ф}$ для вакуумного фотоэлемента и фотоумножителя, то она может быть представлена в виде графиков *а* и *б*, показанных на фиг. 53.

Пользование графиками рассмотрим на примере. Допустим, что работа происходит с вакуумным фотоэлементом, имеющим SbCs фотокатод, причем заданы полоса усиливаемых (пропускаемых) частот $\Delta f = 10^3$ *гц* и сопротивление в цепи анода $R = 10^6$ *ом*. Тогда при фототоке $i_{ф} = 10^{-9}$ *а* отрезок между кривой и исходной точкой составляет




Фиг. 53. Зависимость отношения сигнала к помехе (шуму), выраженная в децибелах, от величины тока фотокатода.

*а* — в случае вакуумного фотоэлемента; *б* — в случае многокаскадного фотоумножителя.

$\rho_{\partial б}=74-30=44$ *дб*, или $\lg \rho=\frac{44}{20}=2{,}2$, откуда $\rho=160$. Следовательно, $\sqrt{\overline{u_п^2}} \approx 0{,}006 u_c$.

При $\gamma=100$ *мка/лм*$=10^{-4}$ *а/лм*

$$F=\frac{i_ф}{\gamma}=\frac{10^{-9}}{10^{-4}}=10^{-5} \text{ лм}.$$

Таким образом, при полосе пропускания $\Delta f=1\,000$ *гц* поток $F=10^{-5}$ *лм* может быть измерен с точностью 0,6%.

Чтобы иметь возможность измерять более слабые потоки, прибегают к ряду мер. Одной из таких мер является сужение полосы пропускания.

Наиболее просто это достигается шунтированием сопротивления $R$ конденсатором такой емкости $C$, чтобы $\Delta f=\frac{1}{2RC}$, где $R$ дано в омах, $C$ — в фарадах, а $\Delta f$ — в герцах.

Другой мерой является увеличение сопротивления $R$. Как следует из фиг. 53, увеличение сопротивления $R$ и одновременное сужение полосы частот $\Delta f$ позволяют измерять и обнаруживать гораздо более слабые фототоки, а следовательно, существенно понизить порог чувствительности фотометра.

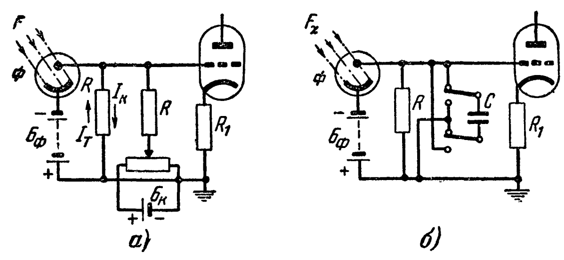
Как видно из графика *б* фиг. 53, применение многокаскадных фотоумножителей позволяет достичь более низкого порога чувствительности, чем в случае вакуумного фотоэлемента.

Здесь ограничение накладывается флюктуациями темнового тока фотоумножителя. Охлаждая фотоумножитель жидким азотом (—196° С), либо другими низкотемпературными охладителями, можно осуществить счет отдельных фотоэлектронов, вылетающих под действием света с фотокатода.

При усилении постоянного фототока ограничение порога чувствительности накладывается в первую очередь не внутренними флюктуациями, а постоянными составляющими темнового тока — термотоком и током утечки.

Ток утечки в цоколеванных фотоэлементах в первую очередь определяется сопротивлением изоляции цоколя. В зависимости от влажности окружающей фотоэлемент среды ток утечки достигает $10^{-8}$ *а* и бо́льших значений,

тогда как термоток с 1 $см^2$ поверхности SbCs фотокатода составляет приблизительно $10^{-13} \div 10^{-14}$ *а*. В фотоумножителях термоток фотокатода и первых эмиттеров усиливается в громадное число раз. Поэтому его влияние становится соизмеримым с током утечки (см. фиг. 17). В случае вакуумных фотоэлементов для улучшения изоляции фотоэлемента выводы анода и катода делают непосредственно на стеклянном баллоне и в противоположные стороны, а сам баллон после сушки спиртом погружают на несколько секунд в расплавленный парафин (температура не выше 60° С!). Так же поступают и с изоляцией вывода анода фотоумножителя.




Фиг. 54. Схемы компенсации темнового тока.

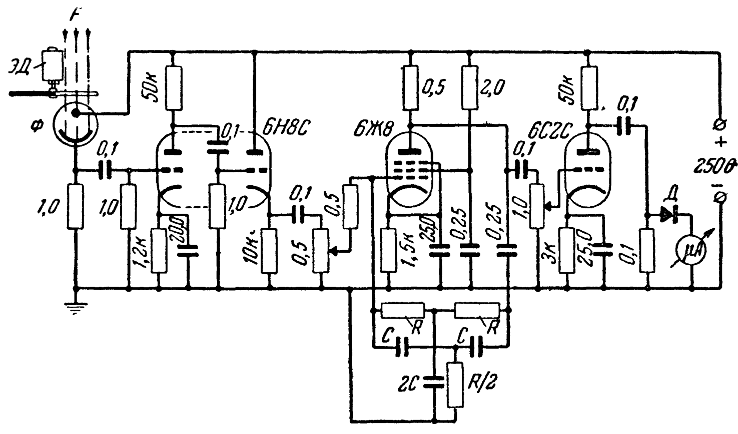
*а* — постоянным током за счет напряжения дополнительного элемента; *б* — путем периодического изменения полярности включения конденсатора.

В ряде задач уменьшение влияния постоянной составляющей темнового тока (а не его флюктуаций) достигают компенсацией темнового тока равным по величине и противоположным по направлению током. При одновременном сужении полосы частот таким путем удается понизить порог чувствительности неохлажденного фотоумножителя приблизительно на порядок.

На фиг. 54 показаны два способа компенсации темнового тока при одновременном ограничении полосы частот. На схеме *а* показана компенсация постоянным током, получаемым за счет напряжения дополнительного элемента. Компенсация осуществляется регулировкой величины напряжения, снимаемого с потенциометра. На схеме *б* компенсация достигается периодическим переключением пластин конденсатора, совершаемым автоматически, например посредством реле, и достаточно часто. Необходимо, чтобы за промежуток времени $\tau$ число четных включений совпадало с числом нечетных включений конденсатора при одинаковой продолжительности каждого включения. Если

одновременно с переключением конденсатора работает оптический затвор, который обеспечивает освещение фотокатода измеряемым потоком $F_x S_1$, например в четные включения конденсатора, то его заряды будут $Q_1 = (i_ф + i_m)\frac{\tau}{2}$ и $Q_2 = \frac{i_m \tau}{2}$, а результирующий заряд за время $\tau$ будет $Q = Q_1 - Q_2 = \frac{i_ф \tau}{2}$.

Другой путь исключения влияния постоянной составляющей темнового тока заключается в модуляции светового потока с последующим усилением модулированного




Фиг. 55. Схема усилителя переменного напряжения с отрицательной обратной связью и Т-образным *RC*-фильтром.

фототока селективным усилителем переменного тока. В подобных усилителях широко практикуется использование одного или двух каскадов с отрицательной обратной связью, в которых применяются Т-образные *RC*-фильтры.

Допустим, что частота модуляции $f_м = 100$ *гц*, а полоса пропускания усилителя $\Delta f = 1$ *гц* при $f_{рез} = 100$ *гц*; тогда при термотоке катода фотоумножителя $i_m = 1 \times 10^{-14}$ *а*, чувствительности фотокатода $\gamma = 10^{-4}$ *а/лм* (100 *мка/лм*), усилении $M = 10^6$ и нагрузке $R = 10^6$ *ом* при $\rho = 1$ $i_ф = 10^{-16}$ *а* и $F_{кор} = 10^{-12}$ *лм* (см. график *б* фиг. 53).

На фиг. 55 показана схема усилителя, содержащего каскад с отрицательной обратной связью и Т-образным *RC*-фильтром. На выходе усилителя находится детектор,

в цепи которого включен микроамперметр, регистрирующий усиленный фототок.

При применении подобной схемы и использовании для модуляции потока электродвигателя, питающегося от сети переменного тока, следует помнить о непостоянстве напряжения и частоты сети, влияющих на скорость вращения ротора и, следовательно, на частоту модуляции. В некоторых случаях применяют более сложные схемы, автоматически исключающие эти недостатки.

## СПОСОБЫ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА И ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЯЕМЫХ ПОТОКОВ

В тех случаях, когда необходимо расширить область спектральной чувствительности фотометра, прибегают к ряду мер.

Одной из таких мер является замена рабочего фотоэлемента другим, чувствительным в требуемой области спектра. Однако такое решение не всегда возможно, так как современные фотоэлементы чувствительны в сравнительно узких участках спектра. В тех случаях, когда необходимо существенно раздвинуть диапазон спектральной чувствительности фотометра, прибегают к трансформации исследуемого излучения в излучение, воспринимаемое фотоэлементом фотометра.

Ультрафиолетовое или рентгеновское излучение обнаруживается при приеме на экран, выполненный из вещества, способного люминесцировать, т. е. светиться вследствие поглощения веществом экрана падающей на него энергии излучения.

Свечение экрана непосредственно воспринимается фотоэлементом и преобразуется в фототок. Чем короче длина волны падающего излучения, тем больше энергия кванта этого излучения и проникающая способность этого кванта, а следовательно, тем толще может быть применяемый люминесцирующий слой экрана.

Инфракрасное излучение, лежащее в длинноволновой части спектра, может быть трансформировано в видимую область спектра посредством электронно-оптических преобразователей.

Для расширения диапазона измеряемых потоков применяют делители напряжения, включаемые на входе первого каскада или промежуточных каскадах усиления.

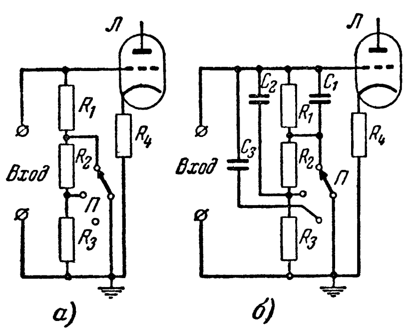
Наиболее целесообразным является включение делителя, представленное схемой *а* фиг. 56; схема *б* дает возмож-

ность поддерживать неизменной постоянную времени $\tau$. Для того чтобы величина $\tau = \frac{1}{4RC}$ оставалась при всех положениях переключателя *П* постоянной, необходимо в рассматриваемой схеме *б* обеспечить следующие условия:

$$\tau = {}^1/_2 R_1 C_1; \ \tau \approx {}^1/_2 (R_1 + R_2) C_2;$$

$$\tau \approx {}^1/_2 (R_1 + R_2 + R_3) C_3.$$

Следует помнить, что чем меньше коэффициент перекрытия, тем точнее измерения. Важно также с максимально возможной точностью подбирать требуемые величины сопротивлений делителя $R_1$, $R_2$ и $R_3$. Число их на практике может быть различным в зависимости от требуемых условий.




Фиг. 56. Схемы входа усилителей тока и напряжения, содержащие делители напряжения.

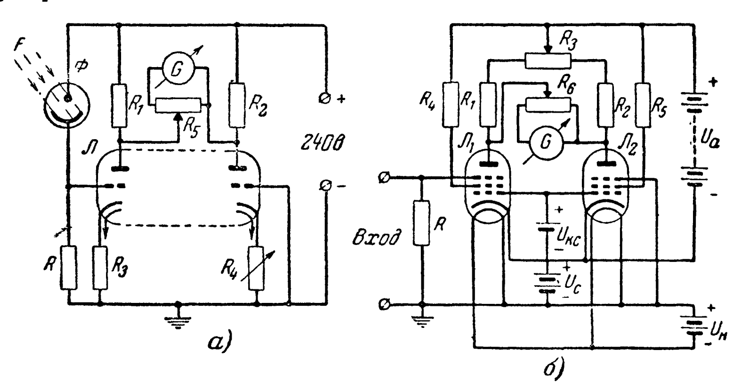
*а* — простая схема; *б* — схема, обеспечивающая неизменное значение постоянной времени входа

Минимальная величина измеряемого потока определяется значениями $F_{пор}$, обусловленными флюктуациями и разрешающей способностью схемы. Для того чтобы наименьшее $F_{мин}$ было измерено с точностью $1^0/_0$, необходимо, чтобы $F_{пор} = 0{,}01\,F_{мин}$, при условии что погрешность отсчета меньше 1%.

Максимальная величина измеряемого потока $F_{макс}$ ограничивается условиями утомляемости фотоэлемента. Однако она может быть расширена весьма значительно, практически до любых требуемых пределов; в случае фотоумножителей и фотосопротивлений это достигается понижением рабочего напряжения, а в случае любых фотоэлементов—применением набора неселективных светофильтров разной степени плотности. Во всех случаях максимальная величина потока при наличии защитного светофильтра не должна превышать такого значения, при котором наступают перегрев и разрушение фотокатода.

## УСИЛЕНИЕ СЛАБЫХ ФОТОТОКОВ

В большинстве измерительных устройств необходимо обеспечить линейную зависимость между усиленным фототоком, который регистрируется измерительным прибором, и измеряемым световым потоком. С этой целью могут быть применены схемы усиления постоянного тока или схемы усиления переменного напряжения. Последние применяются лишь в том случае, когда измеряемый световой поток модулирован.




Фиг. 57. Схема усилителей слабых фототоков.
*а* — простейшая схема; *б* — схема на лампах 6Ж1Ж, работающих в электрометрическом режиме.

Схема *а* фиг. 57 является простейшей схемой усилителя фототока.

Внутренние сопротивления обоих триодов со включенными последовательно с ними сопротивлениями $R_3$ и $R_4$ являются двумя симметричными плечами моста, а анодные сопротивления $R_1$ и $R_2$ — двумя другими симметричными плечами моста. Мост балансируется посредством переменного (желательно проволочного) сопротивления $R_4$. В диагональ моста включен микроамперметр. При балансе моста ток через микроамперметр не протекает. При освещении фотоэлемента через сопротивление $R$ течет фототок $I_ф$. Фототок усиливается левым (по схеме) триодом в $K = \frac{S_d R}{2}$ раз, где $S_d$ — динамическая крутизна сеточной характеристики этого триода, *а/в*. Правый триод, будучи почти идентичным по своим параметрам с левым, служит для компенсации нарушения баланса моста, которое может иметь ме-

сто вследствие изменения внутреннего сопротивления левого триода при изменении питающих напряжений. Коэффициент усиления усилителя тока прямо пропорционален величине сопротивления $R$, которую можно изменять так, как это показано на схеме *а* фиг. 56.

Рассмотрим на примере, какого порядка коэффициенты усиления могут быть достигнуты с усилителями тока.

Задавшись $S_d = 1$ *ма/в*$=10^{-3}$ *а/в* и $R=1$ *мгом*$=10^6$ *ом*, получим: $K=500$. Применяя $R=1\,000$ *мгом*, можно получить $K=500\,000$.

Применение усилителей с большими коэффициентами усиления ограничивается, однако, рядом факторов. К ним относятся поверхностные утечки между выводами сетки и катода лампы, ток сетки лампы, темновой ток фотоэлемента и некоторые другие. У обычных триодов ток сетки достигает $10^{-8}$—$10^{-9}$ *а*. Ток утечки фотоэлемента, определяющий величину темнового тока, приблизительно того же порядка. Например, при изменении тока сетки, равного $10^{-8}$ *а*, на 1% в случае $K = 500\,000$ будут иметь место колебания стрелки в пределах половины шкалы микроамперметра, вся шкала которого равна 100 *мка*. Очевидно, что возможность измерения слабых световых потоков в случае схемы усиления постоянного тока ограничивается в первую очередь величинами тока сетки усилительной лампы и темнового тока фотоэлемента.

Эти недостатки могут быть устранены применением специальных *электрометрических ламп*, работающих в таком режиме усиления постоянного тока, при котором ток сетки уменьшается до $10^{-14}$—$10^{-15}$ *а*, а также принятием ряда мер по уменьшению темнового тока фотоэлемента.

Большинство электрометрических ламп представляет собой четырехэлектродные лампы, обладающие двумя сетками: 1) катодной или так называемой сеткой пространственного заряда, расположенной вблизи катода, и 2) управляющей сеткой.

К сетке пространственного заряда подводится положительный потенциал; это способствует рассеиванию электронного облака вблизи катода, позволяя электронам, эмиттированным катодом, достигать анода при очень малом анодном напряжении. В связи с этим электрометрическая лампа работает при потенциалах, более низких, чем потенциал ионизации газа, что позволяет почти полностью устранить ионную составляющую сеточного тока.

Электрометрические лампы снабжены низкотемпературными катодами и работают при пониженном напряжении,

а также имеют хорошую изоляцию управляющей сетки. Все эти меры позволяют существенно уменьшить ток сетки.

Вместо электрометрических ламп часто пользуются обычными электронными лампами, используя их в *электрометрическом режиме,* при котором ток в цепи управляющей сетки ничтожно мал. Чтобы достичь этого, ближайшую к катоду сетку используют в качестве катодной сетки (в нормальном режиме — управляющая сетка) и придают ей положительный потенциал, а сетку, расположенную вблизи анода (в нормальном режиме — пентодная сетка), используют в качестве управляющей сетки и придают ей отрицательный потенциал; при этом сама лампа работает при пониженных напряжениях анода и накала. Часто в электрометрическом режиме используют лампу 6Ж1Ж при напряжениях: $U_н = 3 - 4$ *в*; $U_a = 6 - 12$ *в*; $U_{к.с} = 0{,}5 - 1$ *в*; $U_c = -(2 - 3)$ *в*; $U_э = 6 - 12$ *в*.

Схема *б* фиг. 57 изображает усилитель постоянного тока, выполненный на лампах 6Ж1Ж, работающих в электрометрическом режиме.

Другой путь, позволяющий преодолеть затруднения, связанные с наличием темнового тока и тока сетки, заключается в применении усилителя переменного тока, который был рассмотрен выше (фиг. 55).

В ряде задач автоматики и измерительной техники электронные и ионные лампы могут быть с успехом заменены кристаллическими диодами и триодами, а также магнитными усилителями. Укажем здесь лишь, что магнитные усилители позволяют усиливать мощности порядка $10^{-12} \div 10^{-13}$ *вт*, а их коэффициент усиления может достигать 500 000 при малом габарите и хорошей механической прочности усилителя.

## ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ

**Фотоэлектрический экспонометр.** Каждый фотограф и фотолюбитель знает, сколь важно правильное определение выдержки, т. е. времени, в течение которого облучается фотографическая эмульсия световым потоком, проходящим через оптику фотографического аппарата. Определение выдержки посредством справочных таблиц сложно, неудобно и позволяет лишь весьма приближенно установить величину экспозиции. Наиболее удобно оценивать экспозицию посредством фотоэлектрического экспонометра.

Рассмотрим вначале, каким образом достигается правильное определение выдержки. Допустим, что фотографированию подлежит объект площадью $S$, освещаемый потоком $F$. Поверхность объекта

обладает некоторым средним значением коэффициента отражения $\rho$, в результате чего отражаемый объектом поток $F_\rho = \rho F$.

Яркостью поверхности $S$, светящейся в результате освещения ее потоком $F_\rho$, является величина $B=\frac{F_\rho}{\pi S}$. Если поверхность $S$ выражена в квадратных сантиметрах, а поток $F_\rho$ — в люменах, то яркость $B$ выражается в *стильбах* (*сб*). В некоторых случаях, когда имеют дело с малыми значениями яркости, пользуются *децимиллистильбом* (*дмсб*) или *апостильбом* (*асб*). 1 *дмсб*$=10^{-4}$ *сб*; 1 *асб*$=3{,}2\cdot10^{-5}$ *сб*.

Яркость $B$ объекта создает на поверхности фотопленки, находящейся в камере фотографического аппарата, освещенность $L=a\omega B$, где $a$ — коэффициент потери света в оптике аппарата; $\omega$ — телесный угол падающего светового пучка. Здесь $B$ выражено в апостильбах, а $\omega=\frac{\pi C^2}{4}$, где $C=\frac{d}{f}$ называется *относительным отверстием объектива*, обладающего действующим отверстием диаметром $d$ и фокусным расстоянием $f$. Величина $C^2=\left(\frac{d}{f}\right)^2$ характеризует светосилу объектива.

При съемке фотопленка экспонируется в течение $t$ сек. Величина $Lt$ называется *экспозицией*, где $L$ — освещенность, *лк*. Она характеризует количество световой энергии, действующей на фотопленку. Установлено, что $Lt=\frac{30b}{10^P}$, где коэффициент $b=0{,}275$, а величина $P$ — светочувствительность фотографического слоя.

*Светочувствительностью* называется способность фотографического слоя реагировать на действие света. Она характеризуется степенью почернения слоя (проявленного), т. е. оптической плотностью почернения. Например, если светочувствительность выражена в системе ДИН, то у пленки $\frac{17}{10}$ ДИН светочувствительность $P=1{,}7$.

Из рассмотренного выше следует, что $\frac{30b}{10^P}=a\frac{\pi C^2}{4}Bt$, где $B$ выражено в стильбах.

Допустим, что съемка производится фотоаппаратом ФЭД, обладающим объективом „Индустар-10", у которого $C=\frac{d}{f}=\frac{1}{3{,}5}$ и коэффициент $a\approx0{,}26$. Если используется фотопленка чувствительностью $\frac{17}{10}$ ДИН, то

$$Bt=\frac{4\cdot30\cdot b}{a\cdot10^P\pi C^2}=\frac{4\cdot30\cdot0{,}275\cdot3{,}5^2}{0{,}26\cdot10^{1,7}\cdot3{,}14}=10\ \textit{асб}\cdot\text{сек.},$$

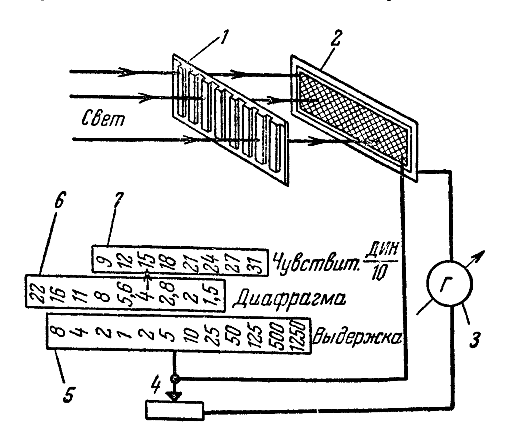
или $Bt=3{,}2\cdot10^{-4}$ *сб*·сек.

Поток $F_\rho$, падающий на фотопленку в течение $t$ сек., будет: $F_\rho t=\pi SBt$, где $S$ выражено в квадратных сантиметрах. Обычно поверхность объекта довольно велика. Ее удобнее выражать не в квад-

ратных сантиметрах, а в квадратных метрах. Так как $S_{[см^2]}=10^{-4}S_{[м^2]}$, то, выражая $S$ в квадратных метрах, получим: $F_\rho t=10^{-4}\pi SBt$.

Допустим, что $S=1$ $м^2$. Тогда в рассмотренном выше примере $F_\rho t=10^{-4}\cdot 3{,}14\cdot 1\cdot 3{,}2\cdot 10^{-4}=10^{-7}$ *лм*·сек. Если $F_\rho=10^{-6}$ *лм*, то $t=\frac{10^{-7}}{10^{-6}}=0{,}1$ сек.

Нетрудно видеть, что увеличение потока $F_\rho$ ведет к уменьшению времени выдержки $t$, и наоборот. Применяя фотоэлектрический экспонометр, измеряющий величину потока $F_\rho$, легко определить время выдержки $t$. Существуют фотографические аппараты, в которых экспозиция определяется фотоэлектрически. Обычно в таких аппаратах в качестве фотоэлектрического экспонометра используются селе-




Фиг. 58. Схема фотоэлектрического экспонометра фотографического аппарата „Киев III“.

новый вентильный фотоэлемент и стрелочный гальванометр, обладающий токовой постоянной $C_i=10^{-6}\div 10^{-7}$ *а*/деление. Чтобы расширить пределы измеряемых потоков, последовательно с гальванометром включают проволочный реостат. Если принять сопротивление нагрузки $R_н=R_г+R$, где $R_г$ — сопротивление гальванометра, а $R$ — сопротивление реостата, то зависимость тока гальванометра $I_г$ от светового потока $F$, падающего на селеновый фотоэлемент, при разных значениях $R_н$, может быть представлена графиками, показанными ранее на фиг. 34.

Фотоэлектрический экспонометр применен в современном советском фотографическом аппарате „Киев-III“. Схема фотоэлектрического экспонометра этого аппарата показана на фиг. 58.

Световой поток проходит через рифленую прозрачную пластинку *1*, ограничивающую поле зрения экспонометра, и падает на фотоэлемент *2*. В цепь фотоэлемента включены гальванометр *3* и реостат *4*, ползун которого соединен с диском *5*, снабженным шкалой выдержки.

На одной оси с диском *5* расположены диски *6* — относительных отверстий (диафрагмы) и *7* — чувствительности пленки, выраженные в $\frac{ДИН}{10}$. Вся система шкал дисков называется калькулятором.

Совместив диски *6* и *7* по значениям диафрагмы и чувствительности вращением диска *5* выдержки добиваются при открытой крышке экспонометра такого положения, при котором стрелка гальванометра становится на некоторое фиксированное деление, обозначенное в виде ромба. Читают величину экспозиции по совпадению положения указателя со шкалой диска *5*, после чего применяют ближайшую возможную для данного аппарата экспозицию.

Многие радиолюбители, являющиеся одновременно фотолюбителями, смогут легко усовершенствовать свои фотографические аппараты, воспользовавшись соображениями, приведенными в данном примере.

**Фотоэлектрические дозиметры рентгеновых лучей.** Для здоровья человека крайне важно учитывать количество энергии рентгеновых лучей, облучающих его тело с лечебной или диагностической целью. Энергия рентгеновского кванта, как и светового кванта, согласно закону Эйнштейна равна $h\nu$ или, заменяя частоту излучения $\nu$ длиной волны $\lambda$, $\frac{hc}{\lambda}$. Количество энергии монохроматического потока рентгеновых лучей $Q_\lambda = N\frac{hc}{\lambda}\tau$, где $N$ — число квант, а $\tau$ — время облучения, сек.

На практике приходится иметь дело не с монохроматическим, а с интегральным потоком рентгеновых лучей $Q_\int = Nhc\tau\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$, где $\lambda_1$ — длина волны наиболее коротких, а $\lambda_2$ — наиболее длинных лучей, излучаемых рентгеновской трубкой.

Поглощаемость рентгеновых лучей одним и тем же веществом различна в зависимости от условий получения лучей. Одни лучи поглощаются сильно, другие—слабо. Первые лучи именуются *мягкими*, вторые — *жесткими*. Закон поглощения выражается в виде: $\Phi = \Phi_0 e^{-\mu d}$, или $\lg\frac{\Phi}{\Phi_0} = -0{,}434\,\mu d$, где $\Phi_0$ — падающий на тело поток, а $\Phi$ — поток, прошедший через тело; $d$ — толщина тела, *см*; $\mu$—коэффициент поглощения, характеризующий жесткость рентгеновых лучей. Установлено, что у трубок с накаливаемым катодом коэффициент $\mu \approx \frac{1}{U^3_{mp}}$, где $U_{mp}$ — падение напряжения между катодом и анодом рентгеновской трубки. Таким образом, величина энергии рентгеновых лучей, поглощаемых телом, зависит еще от напряжения трубки $U_{mp}$.

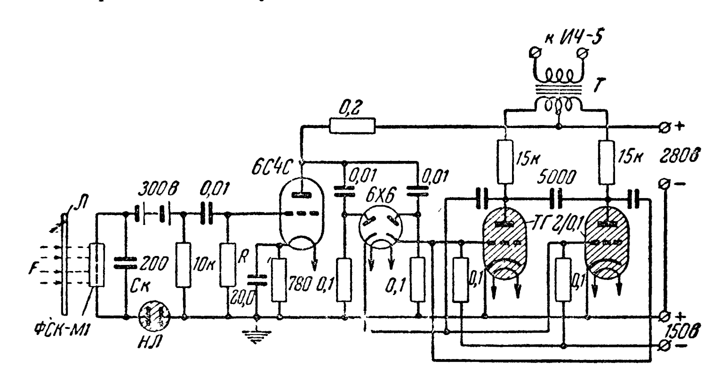
Рентгеновы лучи могут быть регистрируемы как в результате измерения видимого светового потока, излучаемого люминесцирующим экраном, подвергаемым облучению рентгеновыми лучами, так и в результате непосредственной чувствительности полупроводниковых фотоэлементов (вентильных и ФС) к этим лучам.

Фотоэлементы ФЭСС-У обладают высокой чувствительностью к рентгеновым лучам. Как было установлено, при трансформации рентгеновых лучей в видимые посредством люминесцирующего ZnS

экрана фототок возрастал в 7 раз по сравнению с непосредственным облучением фотоэлемента ФЭСС-У-10, расположенного на одном и том же расстоянии от рентгеновой трубки.

Весь дозиметр в этом случае представляет собой простейшую схему фотоэлектрического фотометра непосредственного отсчета, приведенную ранее на фиг. 31. При этом перед фотокатодом располагается лишь люминесцирующий экран.

Если фотоэлемент расположен на жестко фиксированном расстоянии от рентгеновской трубки и напряжение $U_{mp}$ и ее ток $I_{mp}$ фиксированы, то показания гальванометра ($C_i = 10^{-8}$ ампер на деление) могут быть выражены в зависимости от *дозы P*, характеризующей мощность рентгеновых лучей.




Фиг. 59. Схема рентгенодозиметра, используемого для контроля толщины тонких стальных пластин.

Обычно доза $P$ выражается в рентгенах/мин. (*r/мин*).

Необходимо отметить, что ток фотоэлемента зависит от спектрального состава излучения и градуировка дозиметра предварительно проверяется по известному излучению.

Была исследована чувствительность серно-кадмиевых фотосопротивлений к рентгеновым лучам. В результате этих работ были созданы два типа рентгенодозиметров, один из которых рассмотрен ниже. Обладая большой проникающей способностью, рентгеновы лучи могут служить для контроля толщины тонких листов металла. Для этой задачи и предназначен рентгенодозиметр, схема которого показана на фиг. 59, используемый для контроля стальных пластин толщиной 0,08 — 2 *мм* с точностью $\pm$ 1%.

Если режим рентгеновской трубки постоянен и контролируемая металлическая пластина и ФС расположены на фиксированных расстояниях от трубки, то изменение толщины $d$ будет вызывать изменение потока Ф, прошедшего через пластину. Падающий на ФС поток будет изменять его световое сопротивление $R_c$. Фотосопротивление совместно с конденсатором $C_к$ включено в цепь неоновой лампы *НЛ*, работающей в режиме генератора релаксационных колебаний. При постоянстве режима неоновой лампы частота релаксационных колебаний $f$ будет изменяться с изменением толщины пластины. Частота колебаний

$f = \frac{I_{ф}}{A_1 I_{ф} + A_2}$, где $I_{ф}$ — фототок в цепи ФС; $A_1$ — постоянная, определяемая постоянной времени $R_c C_к$ и параметрами неоновой лампы *НЛ*; $A_2$ — коэффициент, определяемый по характеристикам ФС.

Усиленный фототок выпрямляется двойным диодом 6Х6С, после чего выпрямленное напряжение управляет работой мультивибратора. Мультивибратор работает на тиратронах ТГ-2/0,1. Колебания мультивибратора через выходной трансформатор подаются на стрелочный измеритель частоты типа ИЧ-5.

Чувствительность рентгенодозиметра составляет 9 000—3 000 *гц/мм*.

**Фотоэлектрический концентрационный колориметр.** Концентрационные колориметры находят широкое применение в практике различных заводских и научно-исследовательских лабораторий и в сельском хозяйстве. Они основаны на явлении поглощения света в прозрачных окрашенных растворах.

Если $F$ — световой поток, падающий на кювету с анализируемым раствором, а $F_\alpha$ — световой поток, прошедший через раствор, то при толщине раствора $l$ *см* согласно закону Ламберта-Бера имеет место зависимость $F_\alpha = Fe^{-\varepsilon_\lambda Cl}$, или $\lg \frac{F_\alpha}{F} = -0{,}434\varepsilon_\lambda Cl$.

Здесь $\varepsilon_\lambda$ — коэффициент поглощения раствора, при данных длине волны $\lambda$ и температуре раствора, являющийся постоянной величиной, характерной для каждого химического вещества, а $C$ — концентрация вещества. Измеряя фототоки $I_\alpha$ и $I$, пропорциональные потокам $F_\alpha$ и $F$, из их отношения находят величину концентрации $C$ для заданных значений $\varepsilon_\lambda$ и $l$.

Широкое распространение получил отечественный фотоколориметр типа ФЭК-М, предназначенный для массовых химических анализов. Схема колориметра ФЭК-М показана на фиг. 60. Свет от автомобильной лампочки *1* (12 *в*, 25 *вт*) направляется симметрично на два конденсора *2*, проходит через теплозащитные стекла *3*, отклоняется зеркалами *4* и, пройдя через светофильтр *5* (красный, синий или зеленый) и линзы *6*, направляется на кюветы *7*. Перед началом измерений в правый световой пучок помещают кювету с анализируемым раствором, а в левый — кювету с растворителем.

Световые потоки, прошедшие справа через кювету *7*, щелевую диафрагму *9* и линзу *6*, а слева — через кювету *7*, линзу *6* и нейтральные фотометрические клинья *8* (один — для грубой, а другой — для точной настройки), падают на два селеновых фотоэлемента *11*, включенных по дифференциальной схеме, т. е. таким образом, что токи этих фотоэлементов текут навстречу друг другу через нуль-гальванометр.

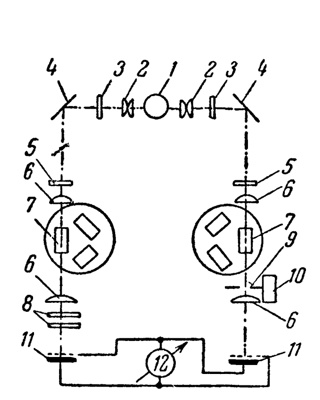
Если $\gamma_{ан} F_{ан} = \gamma_{ср} F_{ср}$ (где $F_{ан}$ — правый, а $F_{ср}$ — левый потоки), то оба фототока равны, в результате чего стрелочный нуль-гальванометр *12* фиксирует нуль.

Раскрыв полностью щелевую диафрагму *9*, введением фотометрических клиньев *8* восстанавливают равенство обоих фототоков, ведя контроль по нуль-гальванометру *12*. Поворотом ручки держателя кювет замещают кювету с анализируемым раствором аналогичной кюветой с растворителем. В результате этого световой поток, падающий на правый фотоэлемент, возрастает. Тогда вращением ручки барабана *10*, связанного со щелевой диафрагмой *9*, уменьшают настолько

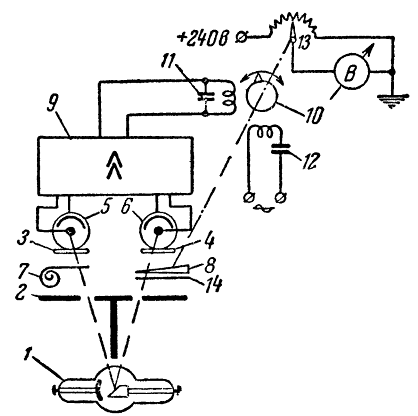
щель диафрагмы, чтобы вновь добиться равенства фототоков. Отсчет по шкале барабана позволяет непосредственно определить плотность раствора $D = \lg \frac{F_\alpha}{F}$ или коэффициент пропускания $T$ раствора, где $T = \frac{F}{F_\alpha}$. Зная величины $T$ или $D$, из таблиц или графиков определяют концентрацию $C$ раствора.

Постоянство режима источника света достигается применением феррорезонансного стабилизатора напряжения.

**Установка автоматического контроля толщины прокатываемой ленты.** Принцип действия установки основан на зависимости степени поглощения рентгеновых лучей от толщины металлической ленты, рассмотренный выше. Излучение, создаваемое рентгеновской трубкой *1* (фиг. 61),




Фиг. 60. Схема фотоэлектрического колориметра типа ФЭК-М.




Фиг. 61. Схема установки для автоматического контроля толщины прокатываемой металлической ленты.

питаемой переменным током высокого напряжения, проходит через две симметрично расположенные щели в экране *2* и падает на два отдельных экрана *3* и *4*, люминесцирующих под действием рентгеновых лучей. Экраны *3* и *4* трансформируют рентгеново излучение в видимое, которое воспринимается соответственно фотоумножителями *5* и *6*. Измерение осуществляется путем сопоставления потока, прошедшего через прокатываемую ленту *7*, с потоком, прошедшим через металлический кольцевой клин *8*, выполненный из того же металла, что и прокатываемая лента. Анодные цепи фотоумножителей включены навстречу друг другу и подключены ко входу усилителя. Так как рентгеновская трубка питается от сети переменного тока, то излучаемый ею поток модулирован. Разностный пульсирующий ток фотоумножителей, имеющий частоту 50 *гц*, усиливается электронным усилителем *9*, на выходе которого включена одна из двух обмоток балансирующего двухфазного электродвигателя *10*, шунтированная конденсатором *11*. Вторая обмотка включена последовательно через конденсатор *12* непосредственно в сеть переменного тока. Такое включение обмоток приводит к сдвигу фаз

тока, протекающего во второй обмотке, по сравнению с током первой обмотки на угол приблизительно 90°.

На оси двигателя *10* укреплены кольцевой клин *8* и ползун реостатного датчика *13*.

При неравенстве обоих потоков на входе усилителя получается пульсирующий фототок, который после усиления питает первую обмотку двигателя, в результате чего его ротор вращается. В случае равенства потоков разностное напряжение на входе усилителя равно нулю и двигатель останавливается. Толщина прокатываемой ленты определяется непосредственно по шкале эталонного кольцевого клина. Чтобы повысить точность измерения, клин перекрывает лишь малый интервал толщин, например 0,2—0,3 *мм*. Установка позволяет измерять ленты толщиной 0,01—2,0 *мм*. Для измерения лент толще 0,2 *мм*, кроме клина *8*, используются калиброванные пластины *14*, изготовленные из того же металла, что и прокатываемая лента. Таким образом, толщина ленты определяется суммой толщин пластинок и клина в фиксированном положении.

Показания шкалы клина могут быть переданы дистанционно на пульт управления прокатным станом, использованы для автоматической записи толщины прокатываемой ленты и автоматического регулирования толщины прокатываемой ленты. Для этой цели служит реостатный датчик *13*, соединенный с автоматическим быстродействующим электронным потенциометром.

Рассмотренная установка позволяет резко повысить точность контроля и облегчить задачу автоматического регулирования толщины прокатываемой ленты.

---

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше были рассмотрены наиболее распространенные виды фотоэлементов, их параметры, характеристики, показаны важнейшие условия их применения; это иллюстрировано на ряде конкретных примеров.

Фотоэлектроника получила в последние годы важное и широкое использование во многих областях народного хозяйства и в научно-исследовательской практике. Перспективы ее дальнейшего развития поистине неисчерпаемы. Применение фотоэлектроники открывает исключительно интересные и благодарные перспективы приложения знаний и творчества радиолюбителей.

Массовый выпуск различных видов и типов фотоэлементов наряду с широким выпуском кристаллических диодов и триодов, магнитных усилителей, миниатюрных и малогабаритных электронных и ионных ламп, разнообразных поляризованных и исполнительных реле, светофильтров, различных источников света и связанной с ними арматуры будет способствовать широкому применению фотоэлектроники в ближайшие годы.

Фотоэлектроника создает базу для мощного развития автоматики и телемеханики, повышения производительности труда и улучшения техники безопасности, проведения научных и производственных исследований на высоком техническом уровне.

## 1. Электрические лампы накаливания

| Тип лампы | Название лампы | U, в | W, вт | F, лм | Средняя продолжительность горения, час. | Размеры *, мм | | | Цоколь |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | D | L | H | |
| Автомобильная . . . | А-16 | 6 | 1,88 | 12,6 | 500 | 12 | 24 | 13 | 1Ш-9 |
| Кинопроекционная . | К3 | 5 | 35 | 77 | 500 | 31 | 91 | 60±3 | Р-14 |
| Прожекторная . . . | ПЖ-45 | 32 | 250 | 4 000 | 500 | 92 | 125 | 69±5 | 2Ш-22 |
| Миниатюрная низкого напряжения . . | МН7 | 2,5 | 1,5 | 5 | 500 | 16 | 30 | 20,5±2 | 1Ш-9 |
| Коммутаторная | К-2411 | 24 | 0,96 | 1,2 | 500 | 6,4 | 46 | — | — |
| Низкого напряжения местного освещения | М09 | 12 | 11 | 100 | 1 000 | 51 | 82 | 53±3 | Р-27 |
| Нормальная осветительная . . . | НВ40 | 127 | 10 | 66 | 1 000 | 61 | 107 | — | Р-27 |
| То же . . . | НВ10 | 127 | 15 | 124 | 1 000 | 61 | 107 | — | Р-27 |
| „ „ . . . | НВ11 | 127 | 25 | 225 | 1 000 | 61 | 107 | — | Р-27 |
| „ „ . . | НВ12 | 127 | 40 | 380 | 1 000 | 66 | 124 | — | Р-27 |
| „ „ . . . | НГ23 | 127 | 100 | 1 275 | 1 000 | 76 | 159 | 118±6 | Р-27 |

* *D*—диаметр, *L*—высота; *H*—высота от цоколя до центра нити накала.

## 2. Тиратроны

| Название тиратрона | $U_к$, в | $I_к$, а | $U_з$, в | $\Delta U_a$, в | $U_{a\ наиб}$, в | $I_a$, а | Вес, г | Долговечность, час. | $R_c$, мгом | Наполнение | Цоколь |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ТГ1Б* | 6,3 | 0,225 | 30 | — | 240 | 0,02 | — | — | 0,01—1 | — | Бесцокольный |
| ТГ1-0,1/0,3 | 6,3 | 0,6±0,06 | 16 | — | 300 | 0,3 | 40 | 200 | 0,1 —10 | Аргон | Октальный |
| ТГ1-0,1/0,3 | 6,3 | 0,6±0,06 | 25 | 11 | 1 300 | 0,1/0,5 | 60 | 500 | 0,1 —10 | Ксенон, криптон | То же |
| ТГ3-0,1/1,3 | 6,3 | 0,6±0,06 | 30 | 11 | — | 0,3 | — | 500 | — | То же | Пальчиковый |
| ТГ1-2,5/4 | 5 | 12 | 140 | 20 | 3 000 | 2,5/8 | — | 500 | 0,001—0,1 | Инертный газ | Специальный |
| ТР1-5/2 | 5 | 15 | 100 | 16 | 2 000 | 15 | 600 | 2 000 | 0,001—0,1 | Ртутное | То же |

* ТГ1Б — миниатюрный тиратрон: $D = 8$ *мм*; $L = 25$ *мм*; тиратроны ТГ1-0,1/0,3 (ТГ-884) и ТГ1-0,1/1,3 (ТГ-2050) выпускаются также в миниатюрном оформлении.

# ЛИТЕРАТУРА

С. Ю. Лукьянов, Фотоэлементы, Изд. АН СССР, 1948.

П. Герлих, Фотоэлементы, Гостехиздат, 1948.

В. Ф. Власов, Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1949, стр. 485—505.

Фотоэлементы, Каталог, Изд. БТИ МПСС, 1952.

Н О. Чечик, С. М. Файнштейн и Т. М. Лифшиц, Электронные умножители, Гостехиздат, 1954.

Б. Т. Коломиец, Промышленные типы фотосопротивлений, «Электричество», 1951, № 11, стр. 44.

Г. А. Федорус и А. И. Скопенко, Серно-кадмиевые фотосопротивления ФСК-М1, «Заводская лаборатория», 1953, № 4, стр. 473.

Б. Т. Коломиец, Некоторые вопросы применения фотосопротивлений, «Автоматика и телемеханика», 1953, № 4, стр. 445.

Б. Т. Коломиец, Изготовление серно-таллиевых фотоэлементов, «Журнал технической физики», 1947, № 2, стр. 195.

В. Е. Косенко и Е. Г. Милесюк, Физические характеристики сернисто-серебряных фотоэлементов, «Журнал технической физики», 1948, № 11, стр. 369.

П. Герлих, Применение фотоэлементов, Изд. иностранной литературы, 1952.

В. П. Филиппов, Фотоэлементы и их применение в полиграфии, Изд. «Искусство», 1952, стр. 22—68

В. А. Михайлов, Электронная автоматика в коммунальном хозяйстве, Изд. Министерства Коммунального хозяйства РСФСР, 1953.

А. А. Хрущев, Фотоэлементы, Изд. «Искусство», (Библиотека киномеханика), 1955.

Б. С. Сотсков, Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств, Госэнергоиздат, 1953

В. С. Григорьев и Б. С. Григорьев, Электронные и ионные приборы, Связьиздат, 1954.

Е. Я. Пумпер, Кристаллические диоды и триоды, Госэнергоиздат, 1953.

Цена 2 р. 60 к.